



T2K実験の最新結果と 系統誤差5%への道

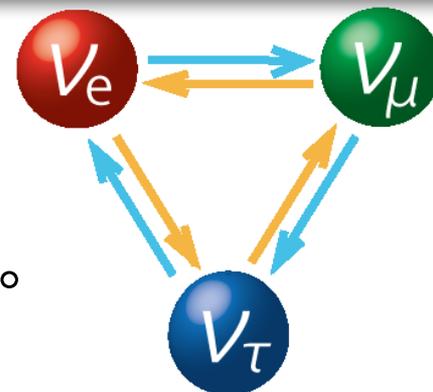
木河達也 (京都大学)

for the T2K collaboration

新学術領域「ニュートリノフロンティアの
融合と進化」研究会 2013

2013年12月7日

- J-PARCでほぼ純粋な ν_μ ビームを生成。
- 生成点直後の前置検出器と295km離れたスーパーカミオカンデでニュートリノを観測。



- ニュートリノ振動の精密測定。

T2K実験における振動モード

1. $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ (ν_e 出現モード)
2. $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 以外 (ν_μ 消失モード)



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



ニュートリノ振動パラメータ

3フレーバーのニュートリノ混合

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{-i\delta} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

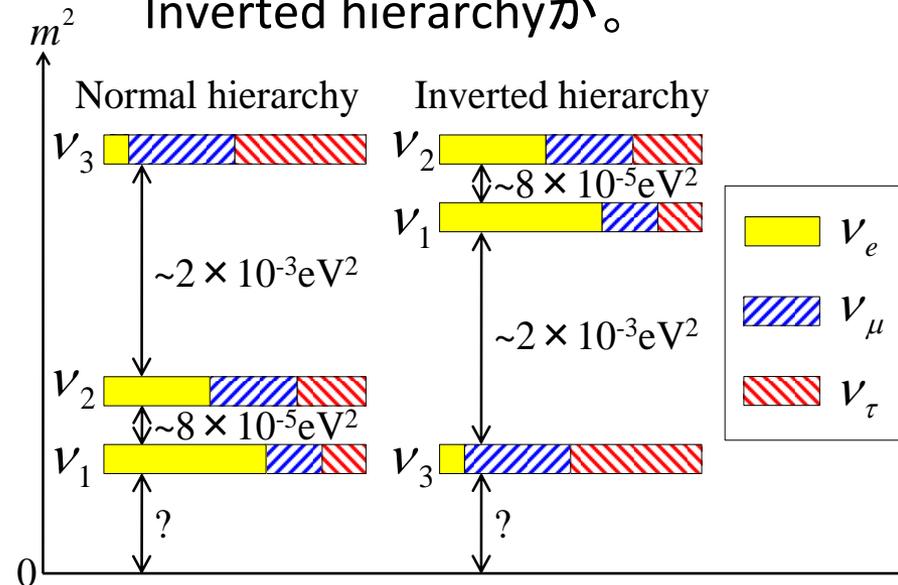
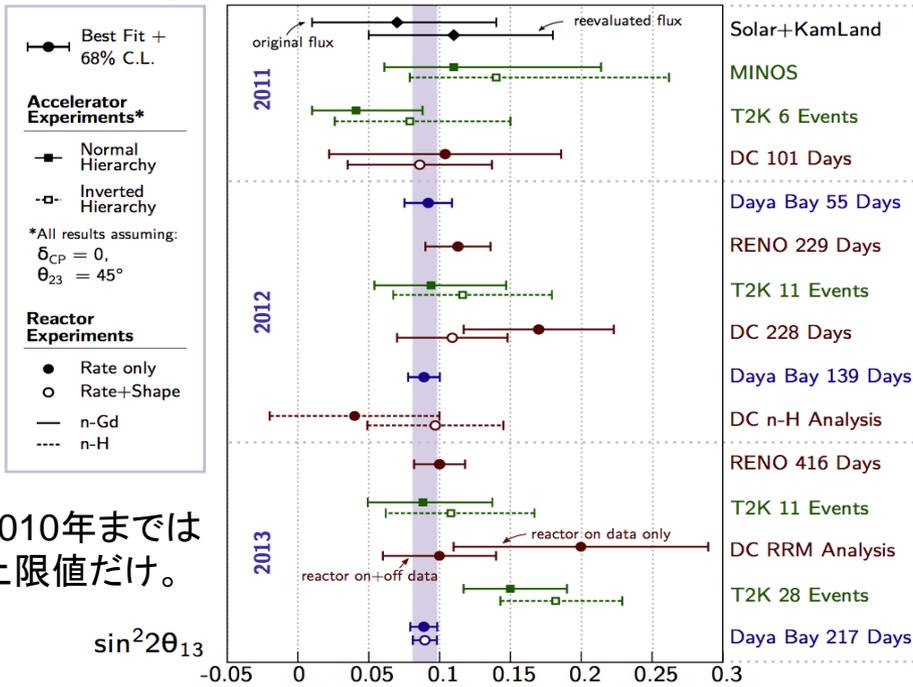
フレーバー固有状態 牧・中川・坂田行列 質量固有状態

現在の測定状況

- $\theta_{12} = 33.6^\circ \pm 1.0^\circ$ 太陽 ν 、原子炉 ν
- $\theta_{23} = 45^\circ \pm 6^\circ$ (90% C.L.) 大気 ν 、加速器 ν
- $\theta_{13} = 9.1^\circ \pm 0.6^\circ$ 原子炉 ν 、加速器 ν

残っている謎

- θ_{23} は 45° か。(または $\theta_{23} < 45^\circ$ か $\theta_{23} > 45^\circ$ か)
- δ は有限か。(レプトンのCP非保存)
- 質量の階層は Normal hierarchy か Inverted hierarchy か。



T2K実験の目的

• ν_e 出現モード

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \underbrace{4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \sin^2 \Delta_{31}}_{\text{Leading}} \underbrace{\sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L(\text{km})}{E_\nu(\text{GeV})} \right)}_{\text{CP conserving}}$$

$$+ 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21}$$

$$- 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \cdot \sin \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \cdot \sin \Delta_{21} \quad \text{CP violating}$$

$$+ 4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \cos \delta) \cdot \sin^2 \Delta_{21} \quad \text{Solar}$$

$$- 8C_{13}^2 S_{12}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{aL}{4E_\nu} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \cos \Delta_{32} \cdot \sin \Delta_{31} \quad \text{Matter}$$

$$+ 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cdot \frac{a}{\Delta m_{13}^2} (1 - 2S_{13}^2) \cdot \sin^2 \Delta_{31}$$

→ θ_{13} の測定。(他のパラメータとも相関。)

さらにはレプトンのCP非保存、
ニュートリノ質量階層性の検証。

補完的

原子炉からの $\bar{\nu}_e$ 消失モード

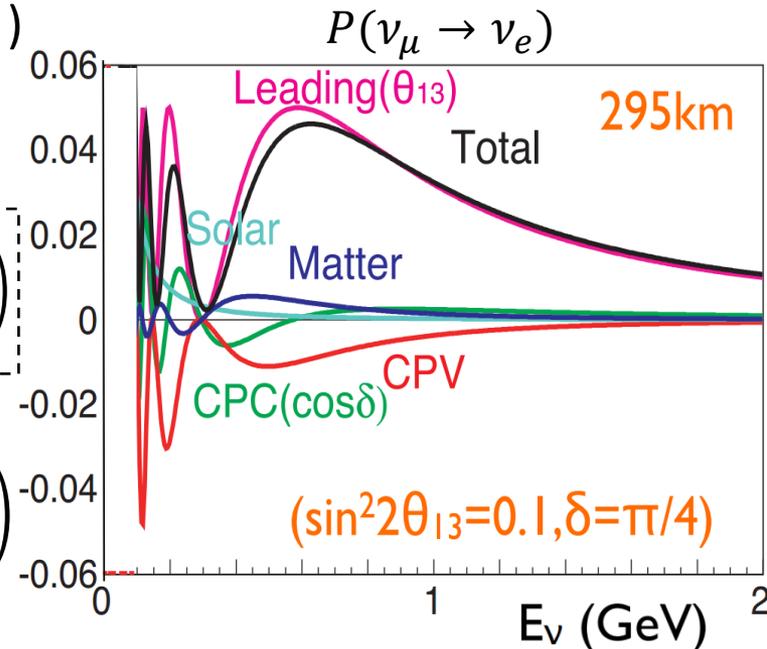
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{31}^2 L(\text{m})}{E_\nu(\text{MeV})} \right)$$

θ_{13} を高精度で測定可能。

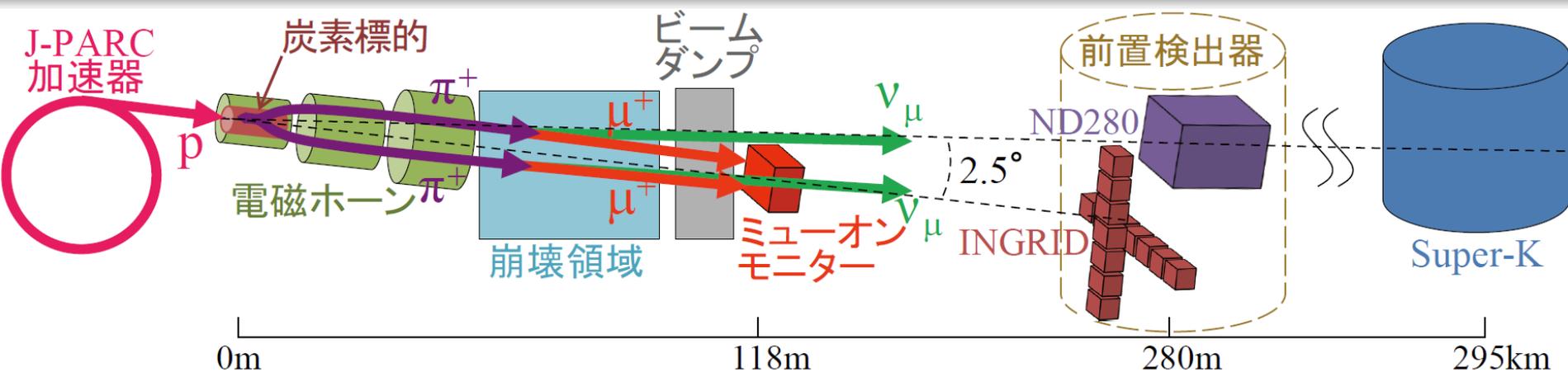
• ν_μ 消失モード

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 L(\text{km})}{E_\nu(\text{GeV})} \right)$$

→ $\theta_{23}, \Delta m_{23}^2$ の精密測定。



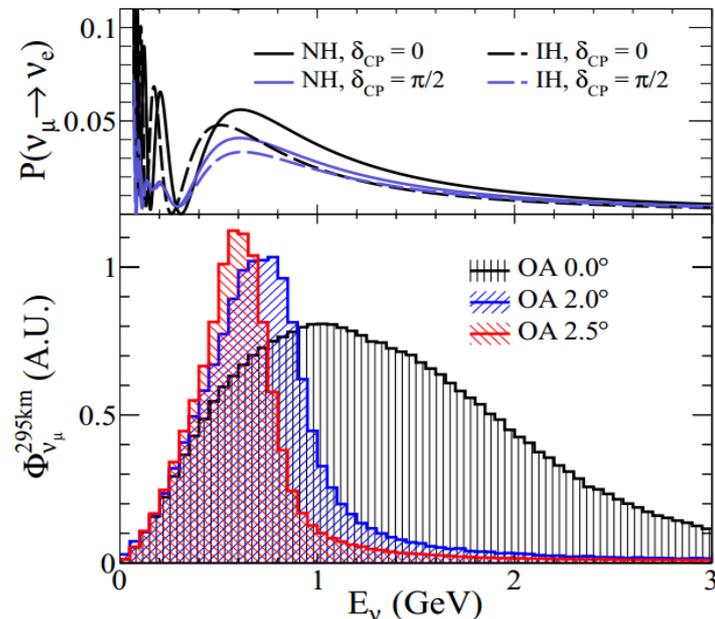
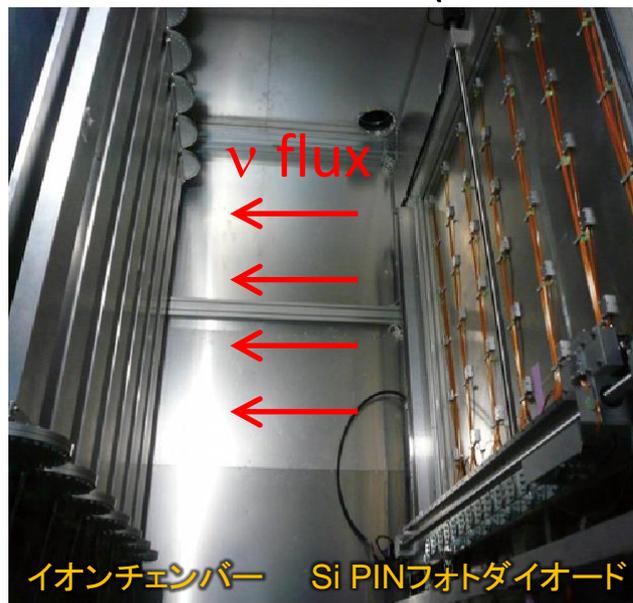
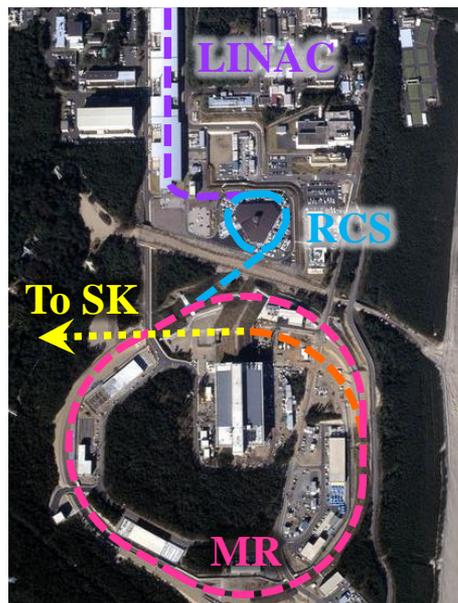
T2K実験のビームライン



J-PARC加速器

ミュオンモニター(MUMON)

Off-axis法

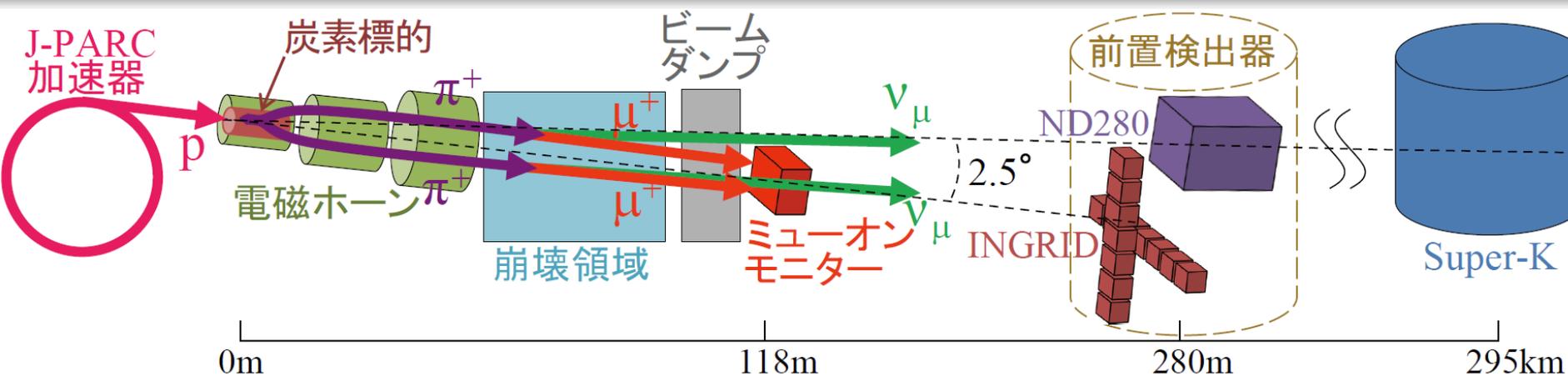


- 3つの加速器
- 陽子を30GeVまで加速

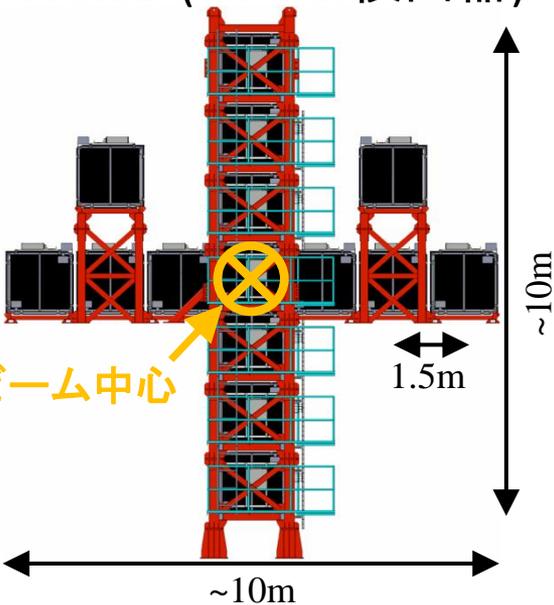
- 2種類の独立な検出器
- 7×7のアレイ

- ビーム中心を2.5度ずらす
- ナローバンドなビームを実現

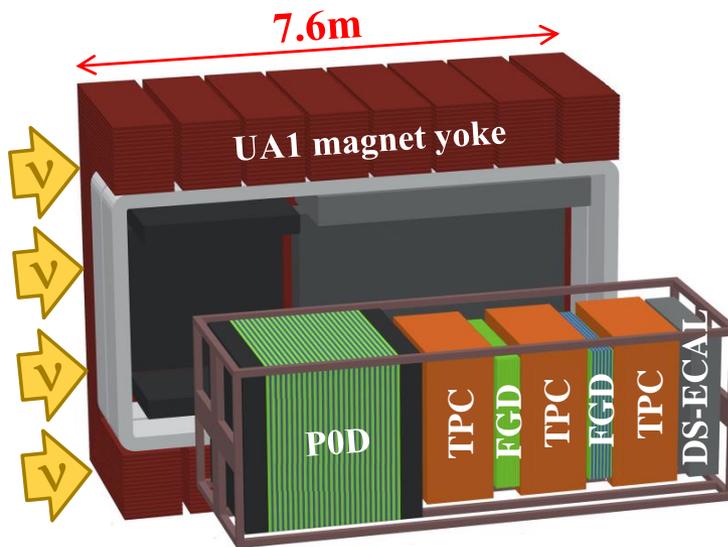
T2K実験のニュートリノ検出器



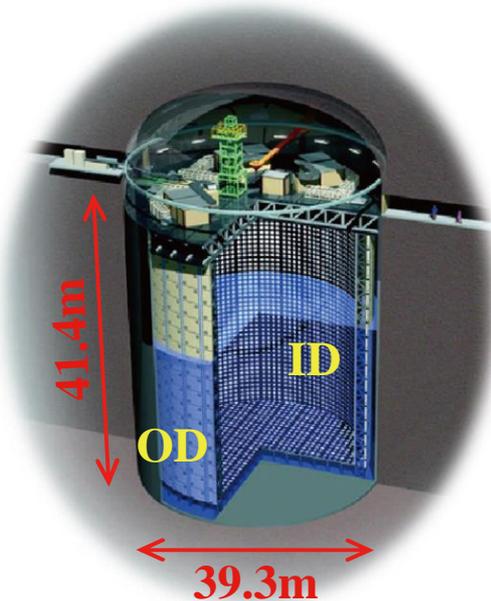
INGRID (on-axis検出器)



ND280 (off-axis検出器)



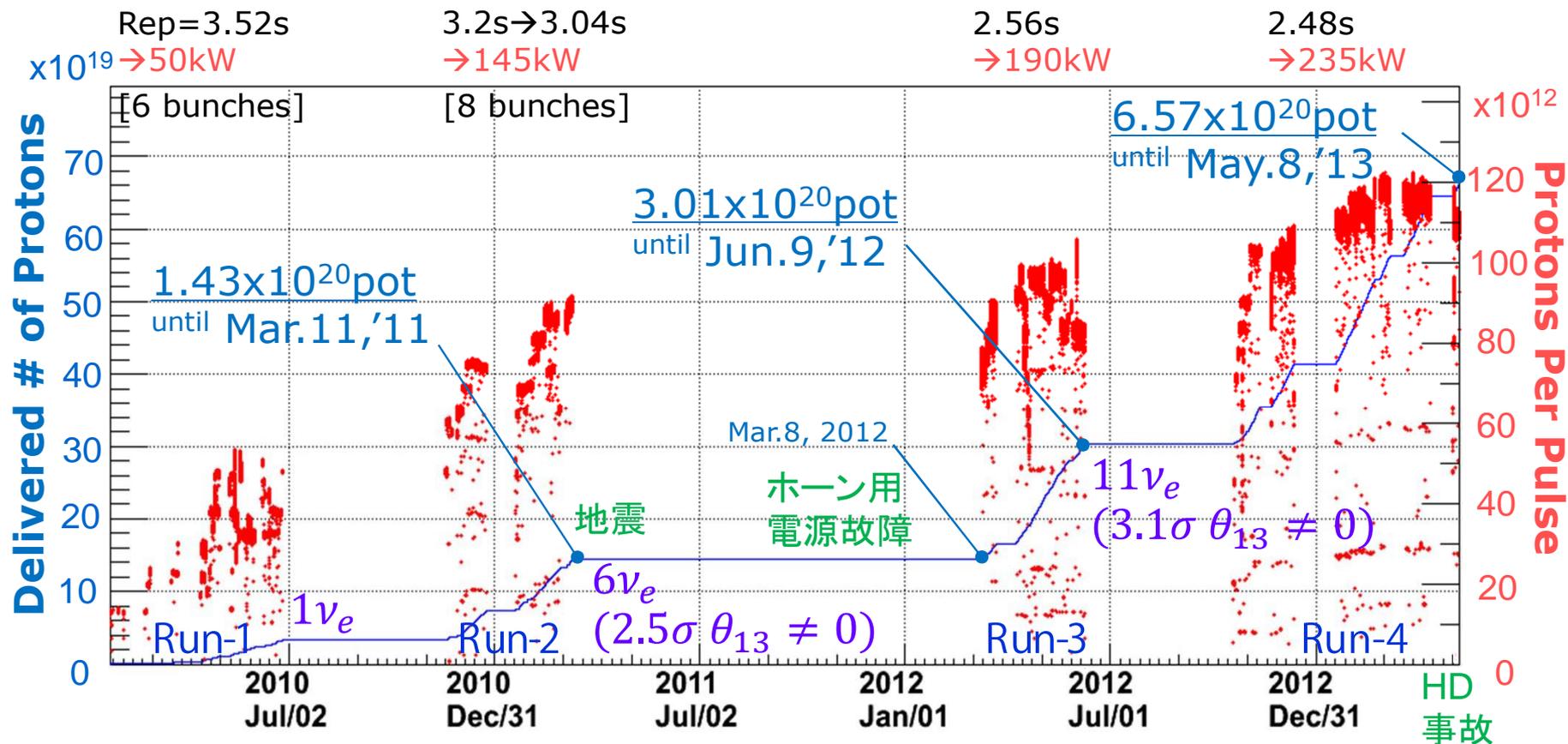
Super-K



- 16台の同一モジュール
- 鉄とシンチレータのサンドイッチ
- 複合型検出器(FGD, TPCなど)
- 0.2Tの磁場
- 50kt水チェレンコフ検出器
- J-PARCから295kmの位置

データ取得

- 震災、ホーン用パルス電源故障など幾多の困難を克服。
- 6.57×10^{20} POT (Proton On Target)のデータを取得。
→T2K実験の目標統計の8%。
- 最高235kWでのビーム運転を達成。(設計値は750kW)



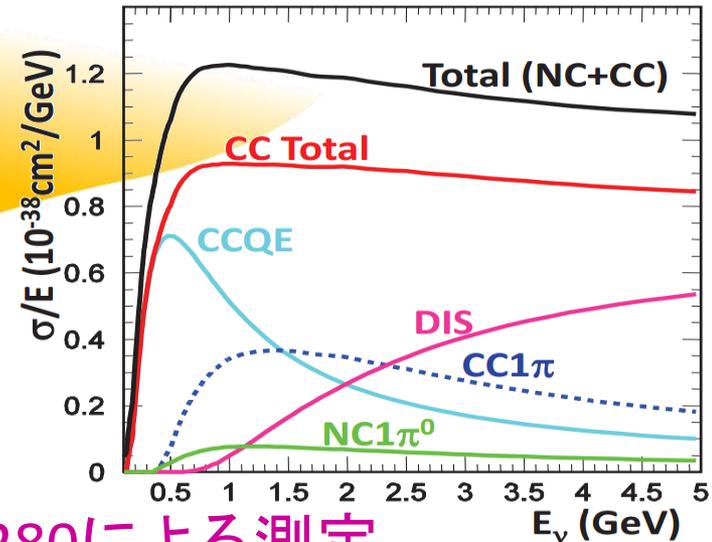
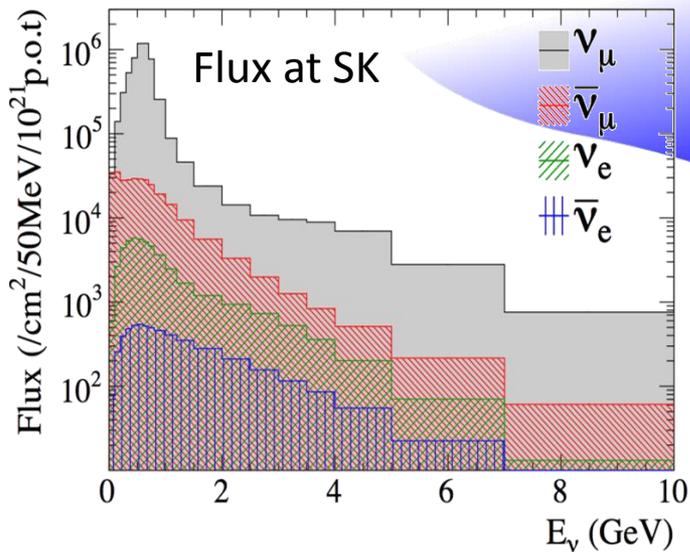
ニュートリノ振動の解析の流れ

ニュートリノフラックス

- 陽子ビームモニターでの測定
- NA61等のハドロン生成データを取り入れたFLUKA, GEANTによるシミュレーション
- INGRIDによるビーム方向の測定

ニュートリノ相互作用

- NEUTによるシミュレーション
- 外部実験からの誤差 (SciBooNE, MiniBooNE, MINOSなど)



ニュートリノ振動パラメータ →

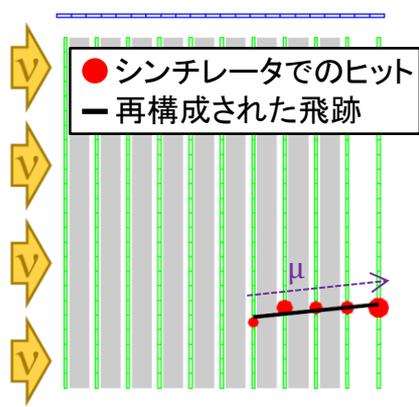
スーパーカミオカンデでの事象予測

比較

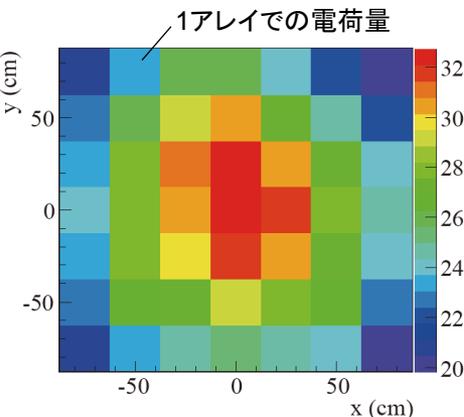
スーパーカミオカンデでの観測結果

INGRID, MUMONでの測定

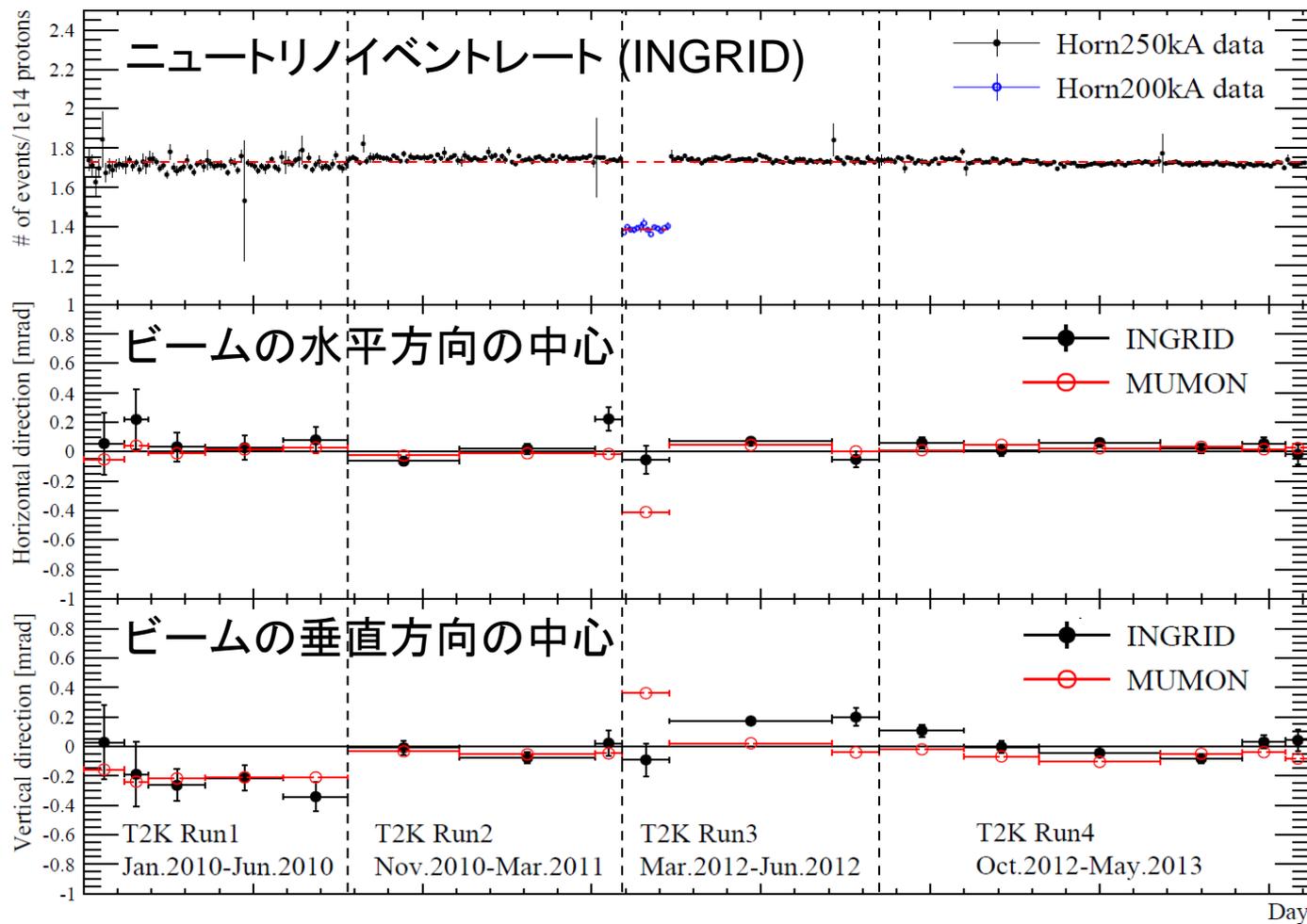
- ニュートリノイベントレートは1%の範囲で安定。
- ニュートリノビーム方向は1mradよりずっと小さい範囲で安定しており、ミュオンビームの方向とよく一致している。



INGRIDのイベントディスプレイ



MUMON (Si)の信号

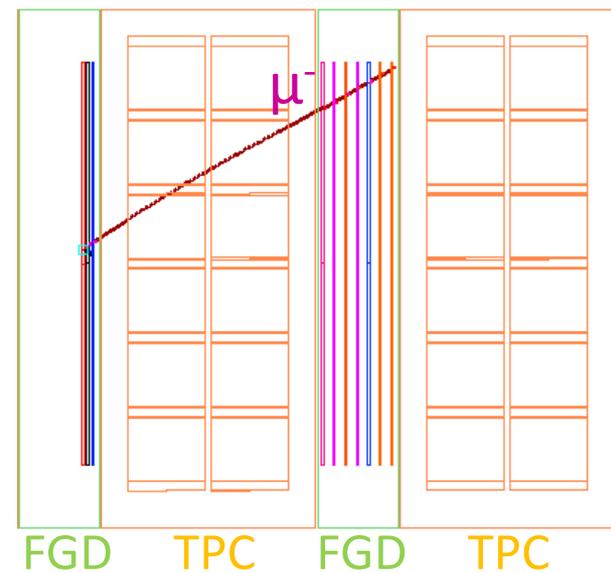


ND280での測定 (イベントの分類)

- 各ニュートリノ相互作用を高純度化した3サンプルに分類。

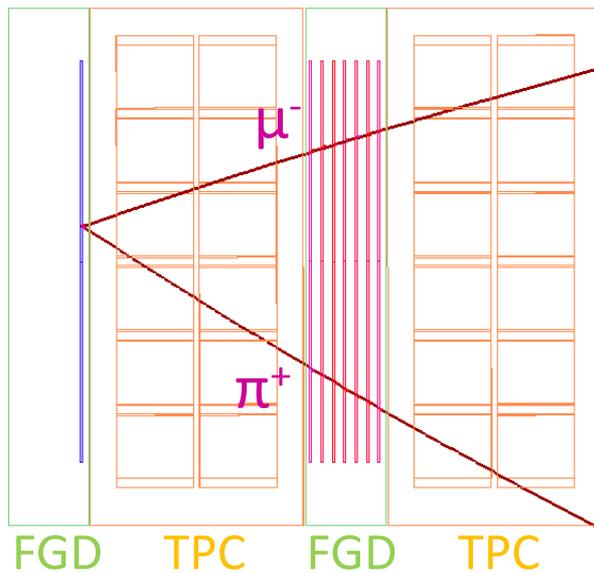
CC0 π サンプル

荷電カレント準弾性散乱が64%



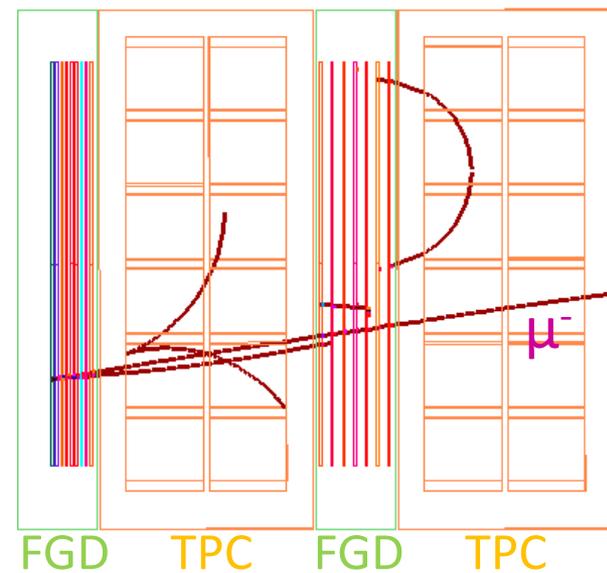
CC1 π サンプル

荷電カレント Δ 共鳴が40%

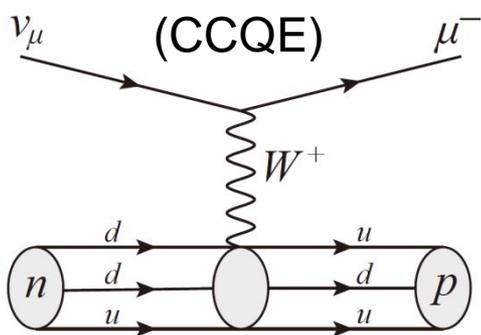


CC otherサンプル

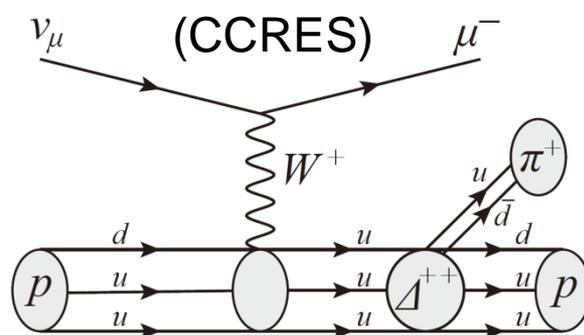
荷電カレント深弾性散乱が68%



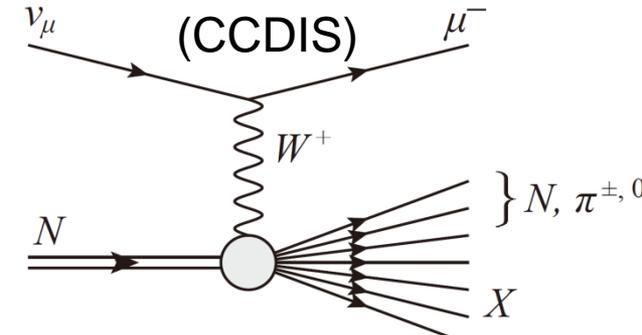
荷電カレント準弾性散乱



荷電カレント Δ 共鳴 π 生成

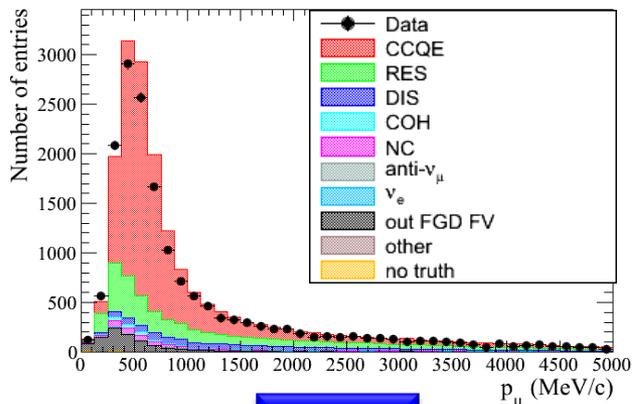


荷電カレント深弾性散乱

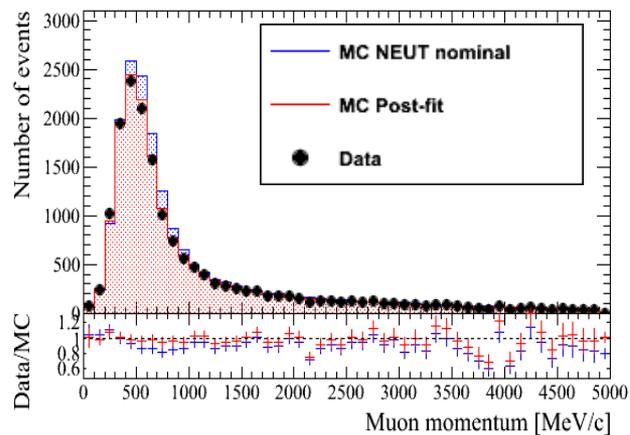
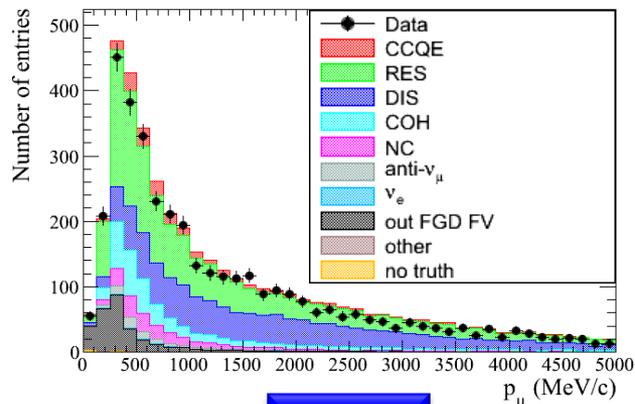


ND280での測定 (フィット)

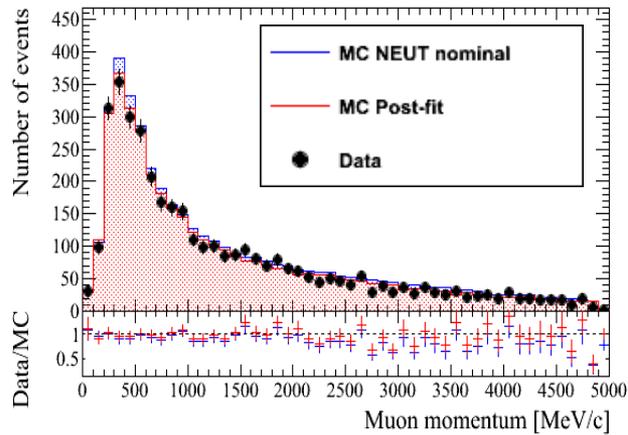
- 各サンプルでのミュオンの運動量、角度分布をフィット。
- 規格化パラメータと誤差を導出。

CC0 π サンプル

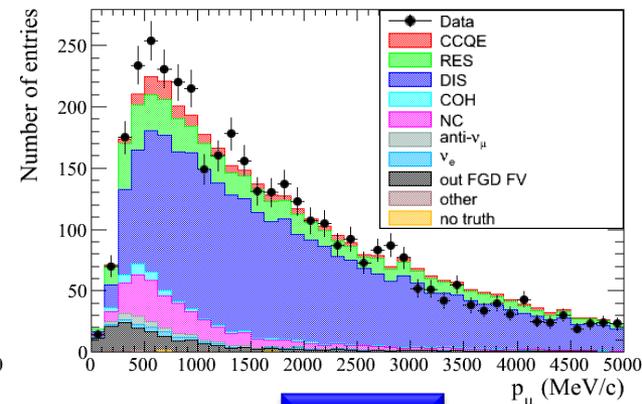
フィット

CC1 π サンプル

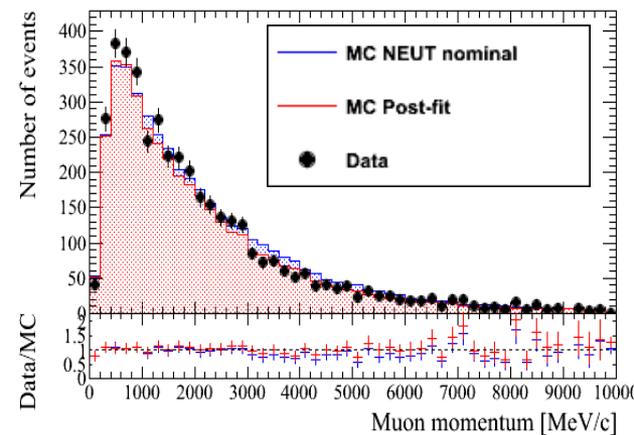
フィット



CC otherサンプル



フィット



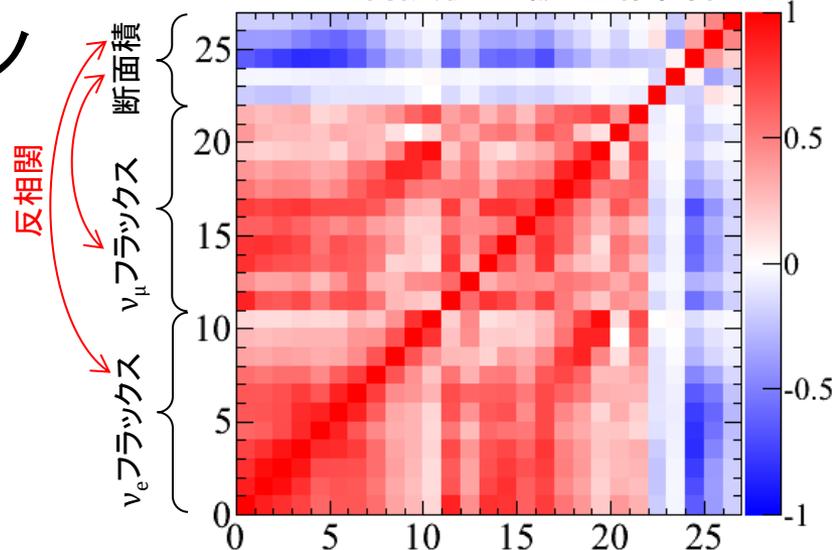
ND280の測定による誤差の制限

- ニュートリノフラックスとニュートリノ反応断面積のパラメータを制限。

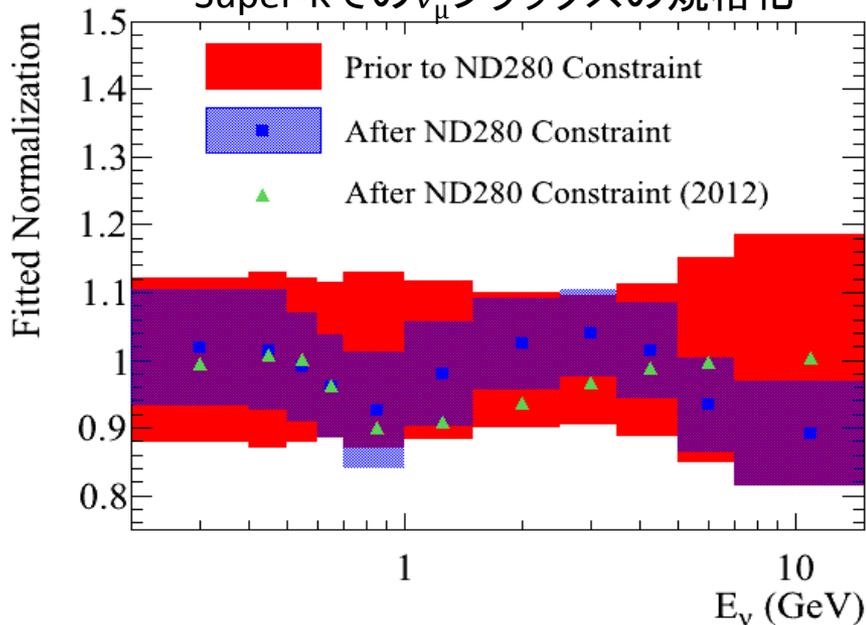
ニュートリノ反応断面積パラメータ

パラメータ	ND280制限前	ND280制限後
M_A^{QE} (GeV)	1.21 ± 0.45	1.240 ± 0.072
M_A^{RES} (GeV)	1.41 ± 0.22	0.965 ± 0.063
CCQE規格化	1.00 ± 0.11	0.966 ± 0.076
CC1 π 規格化	1.15 ± 0.32	1.27 ± 0.16
NC1 π^0 規格化	0.96 ± 0.33	1.14 ± 0.25

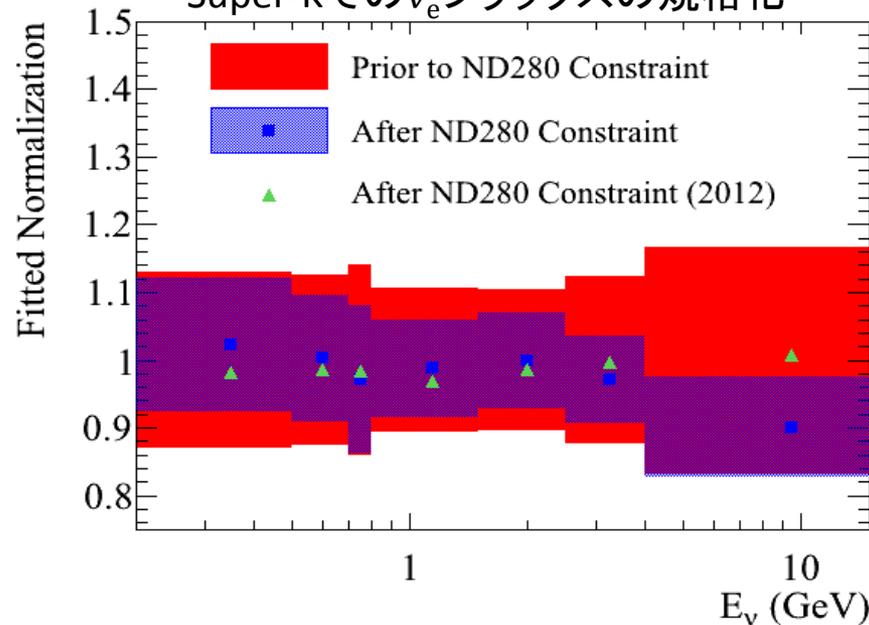
ND280制限後の誤差相関行列



Super-Kでの ν_μ フラックスの規格化

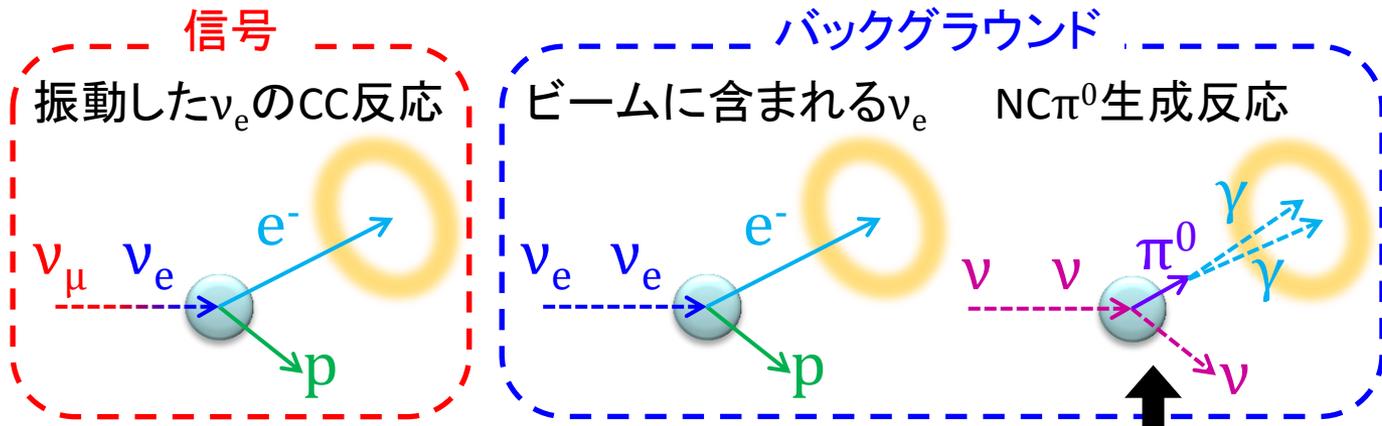


Super-Kでの ν_e フラックスの規格化

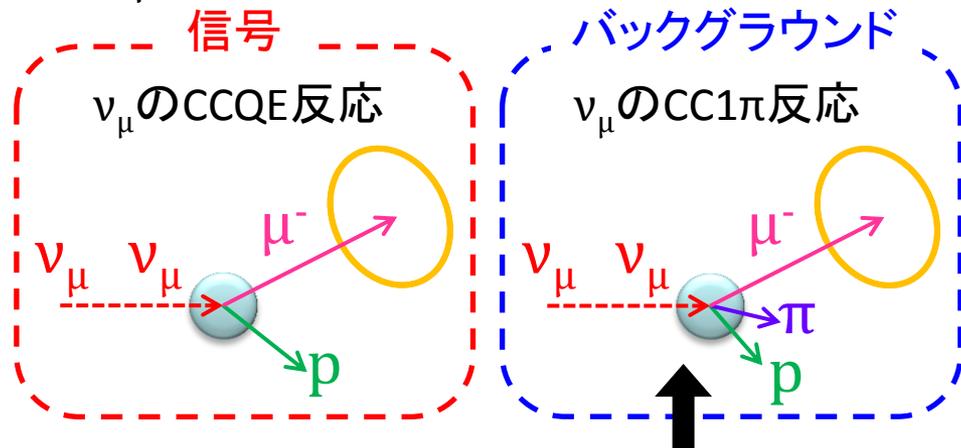


Super-Kでの観測

- ν_e イベント (不明瞭な1リング)

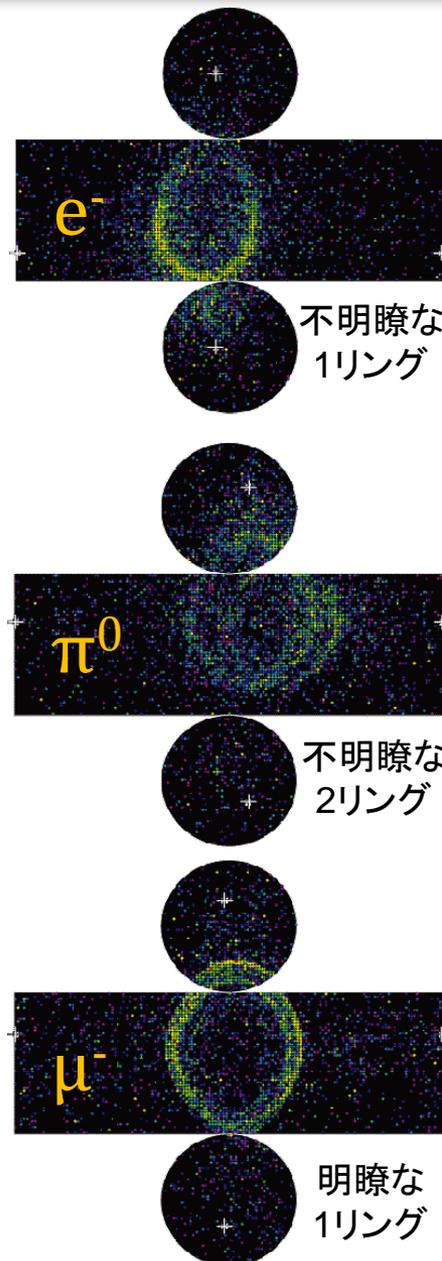


- ν_μ イベント (明瞭な1リング)



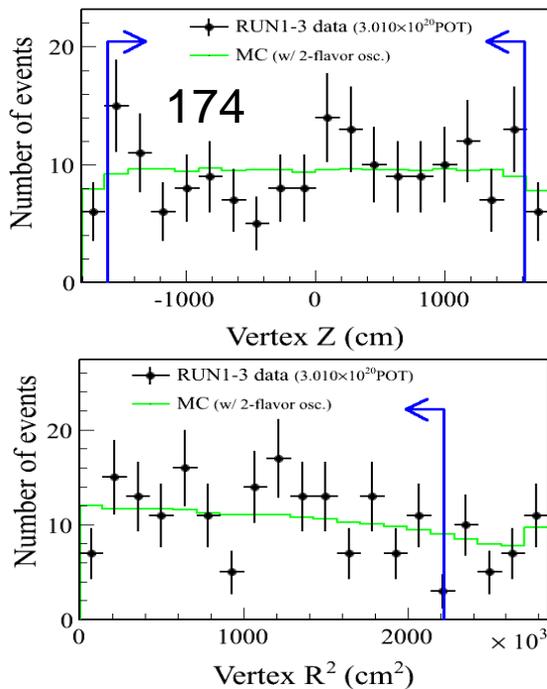
2 γ が同じ方向に出たり、片方が再構成できなかった場合に、 ν_e イベントと誤認される。

CCQEを仮定してエネルギーを再構成しているため、エネルギーを正しく再構成できない。

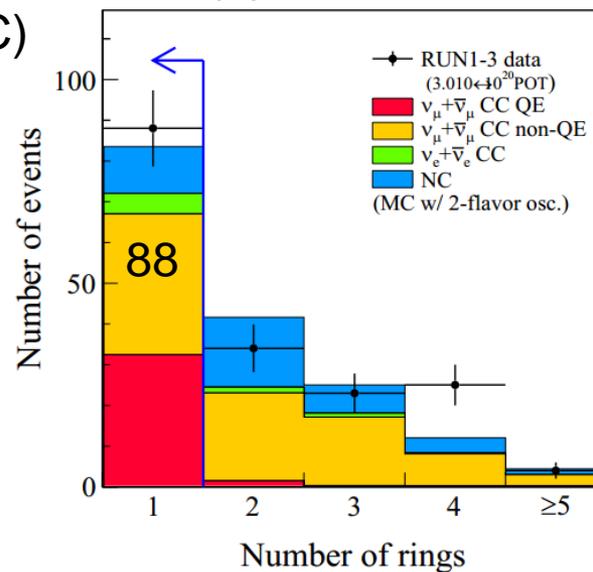


Super-Kの ν_μ イベント選択 (Run1-3)

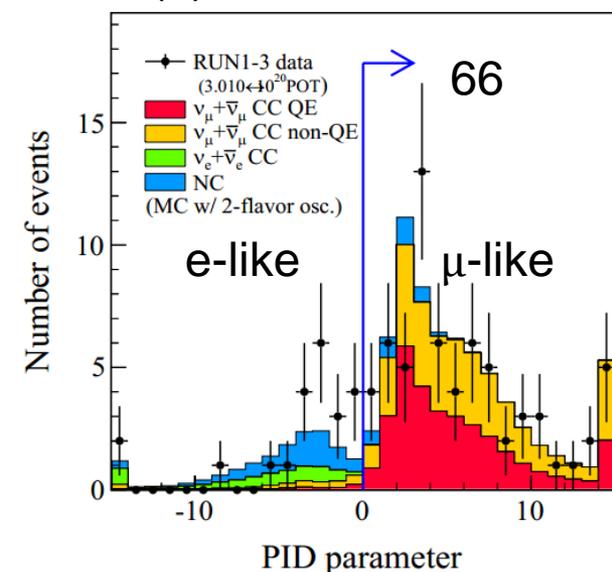
(0) 反応点が有効領域(FV)内、TrackがFully Contained (FC)



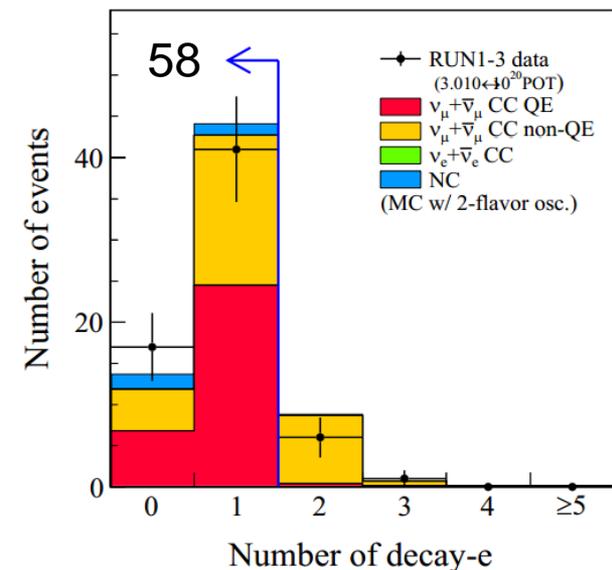
(1) リング数=1



(2) ミューオンライク



(3) 崩壊電子が1個以下



Super-Kでの ν_μ 候補イベント数に対する誤差 (ND280制限後)

誤差の起源	ND280制限前	ND280制限後
ν フラックス × ν 反応 (ND280測定)	21.8%	4.2%
ν 反応 (ND280で制限されないもの)	6.3%	
Super-K (+Super-Kでの相互作用)	10.7%	
Total	25.1%	13.1%

$$|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^2, \quad \sin^2 2\theta_{23} = 1.0 \text{ の場合}$$

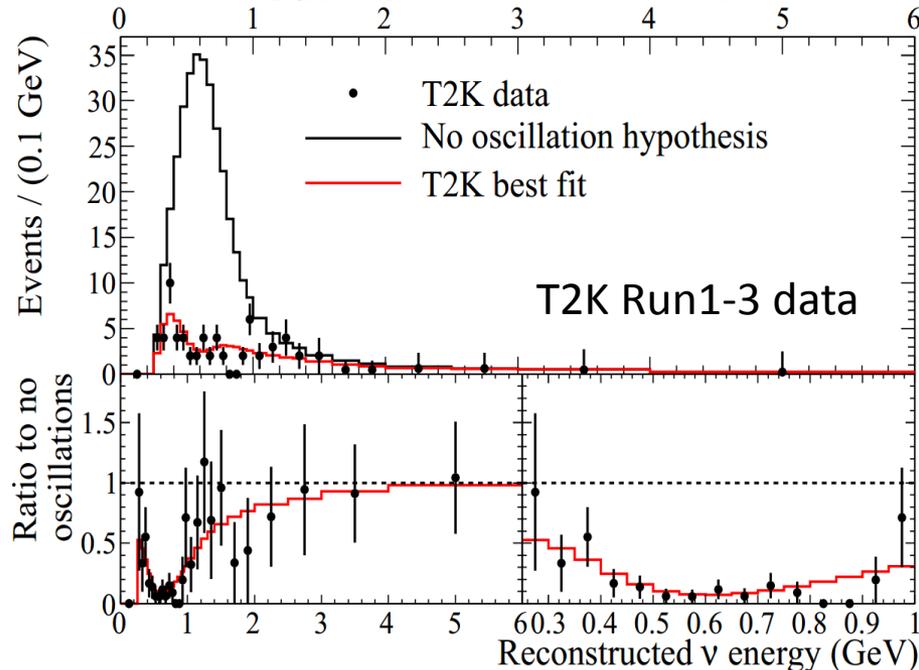
ν_μ 消失モードの測定 (Run1-3)

- Super-Kでのエネルギー分布を尤度比を用いてフィット。
- Run1-3のデータで世界最高レベルの精度で測定。

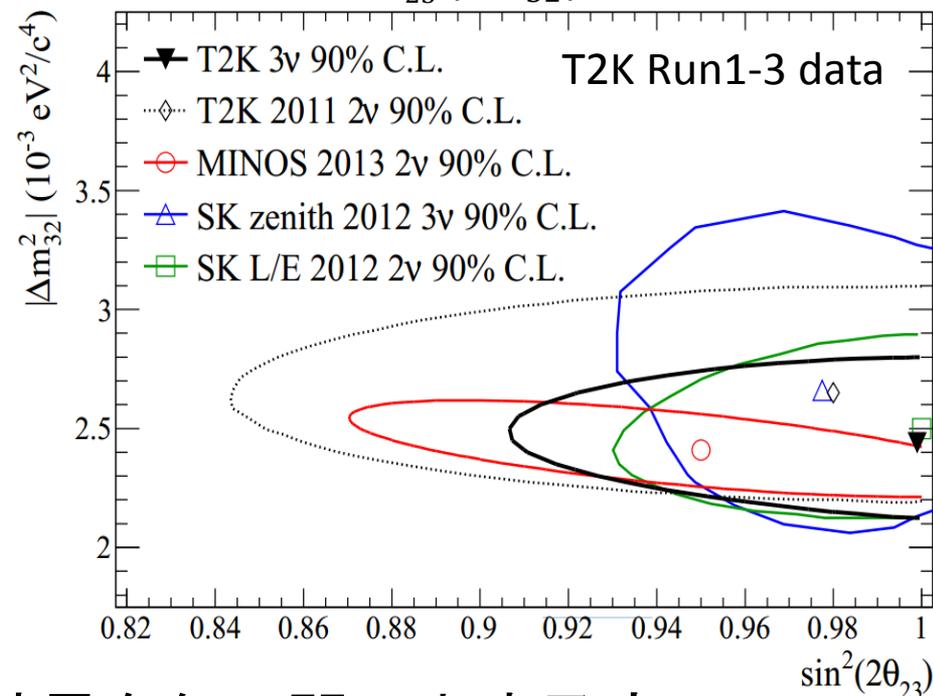
$$\sin^2 \theta_{23} = 0.514 \pm 0.082$$

$$|\Delta m_{32}^2| = 2.44_{-0.15}^{+0.17} \times 10^{-3} \text{ eV}^2 / c^2$$

再構成されたエネルギー分布



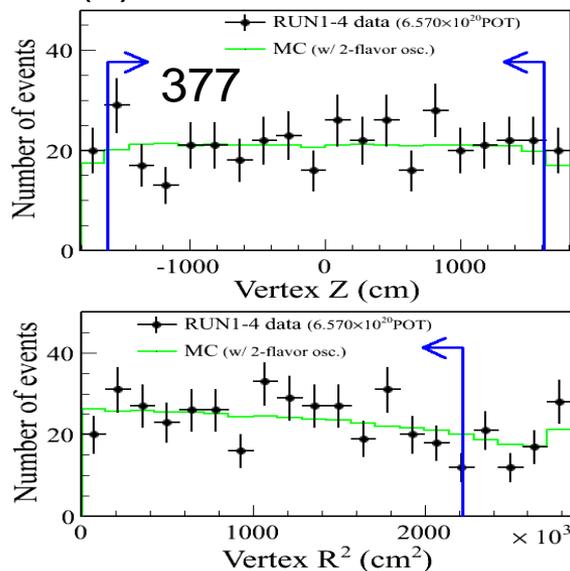
$\sin^2 2\theta_{23} - |\Delta m_{32}^2|$ の信頼領域



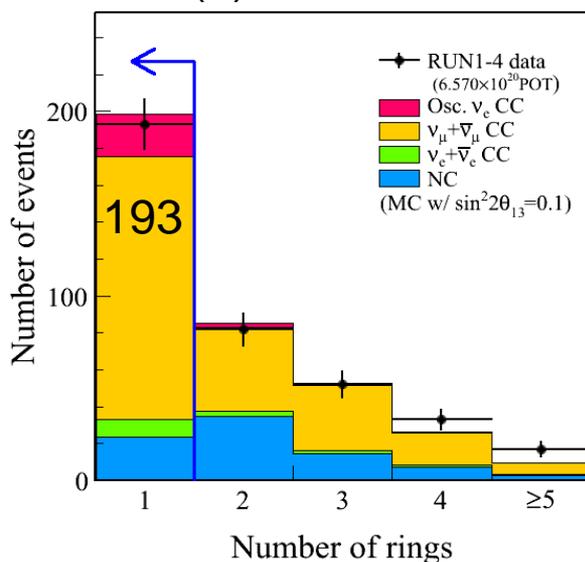
- Run1-4の全データでの解析結果を冬の間に出す予定。

Super-Kの ν_e イベント選択 (従来と同じ基準)

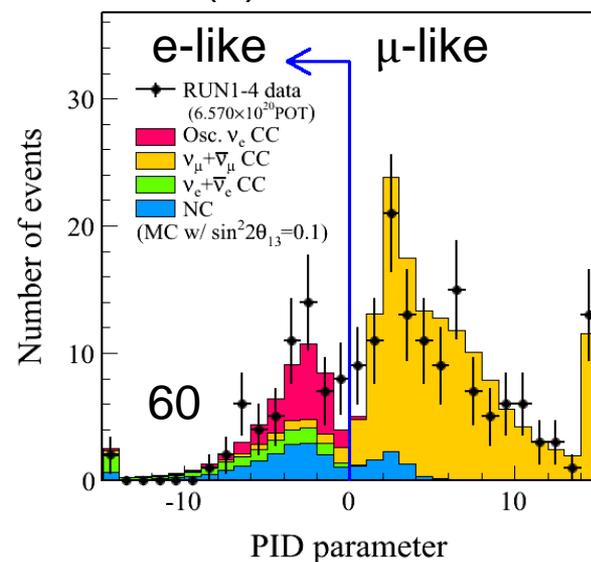
(0) 反応点がFV内、FC



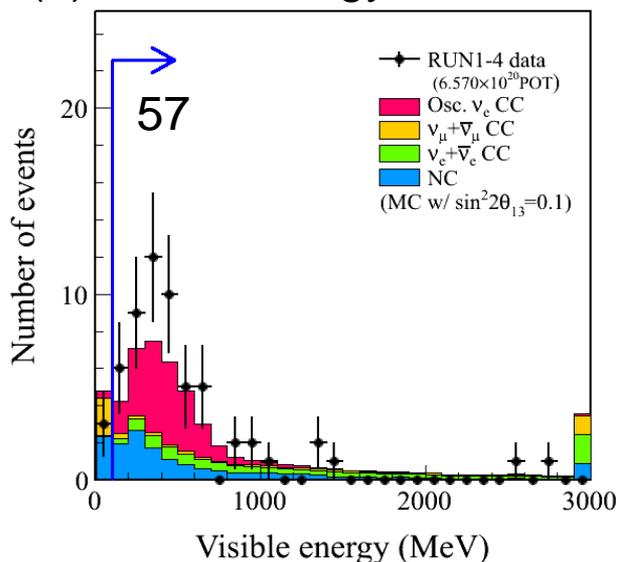
(1) リング数=1



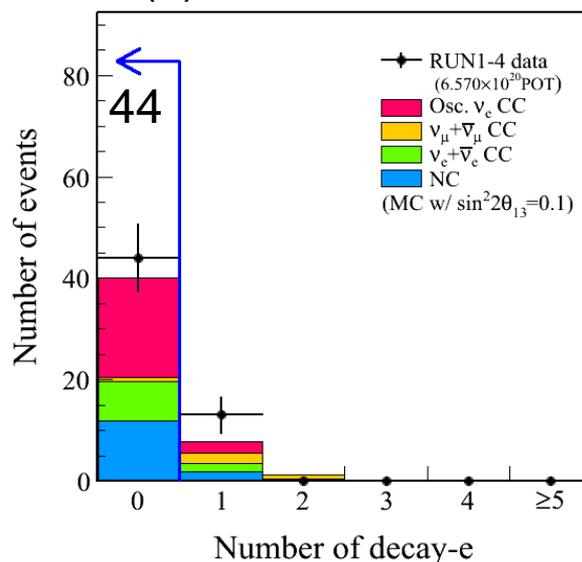
(2) 電子ライク



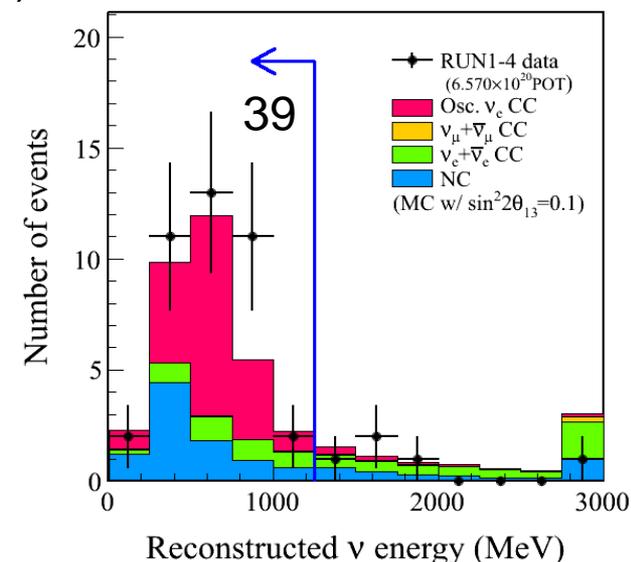
(3) Visible energy > 100MeV



(4) 崩壊電子がない



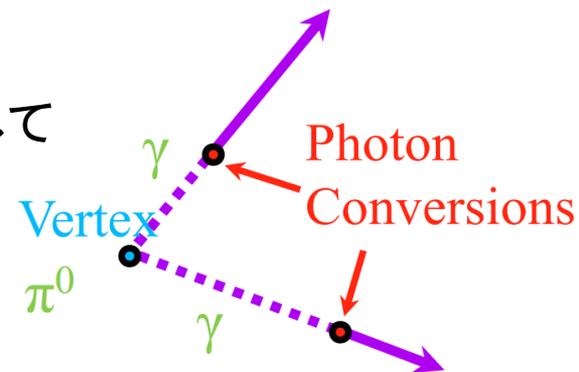
(5) 再構成エネルギー < 1250MeV



Super-Kの ν_e イベント選択 (改良した π^0 除去)

- 再構成アルゴリズム

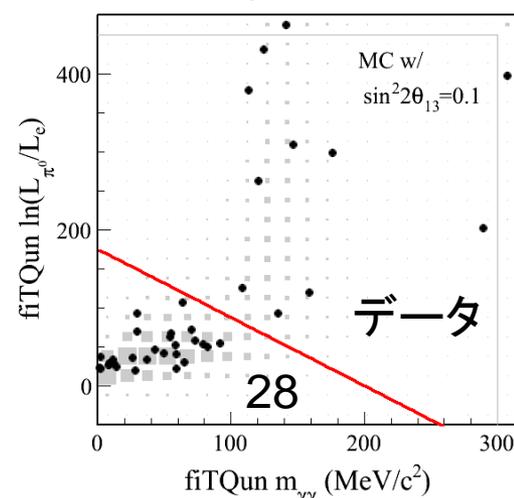
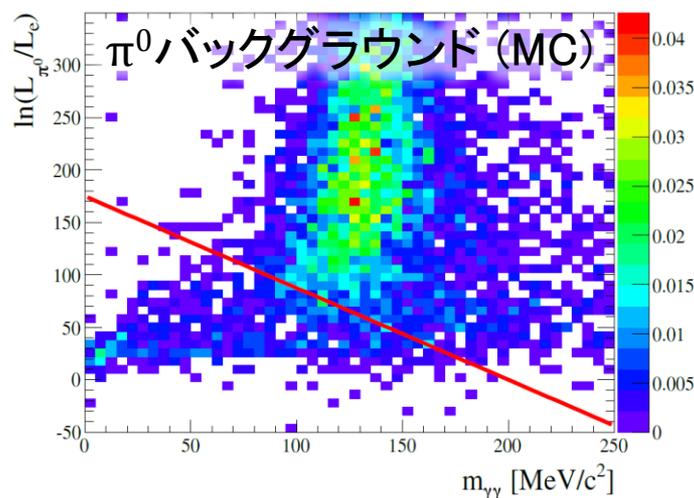
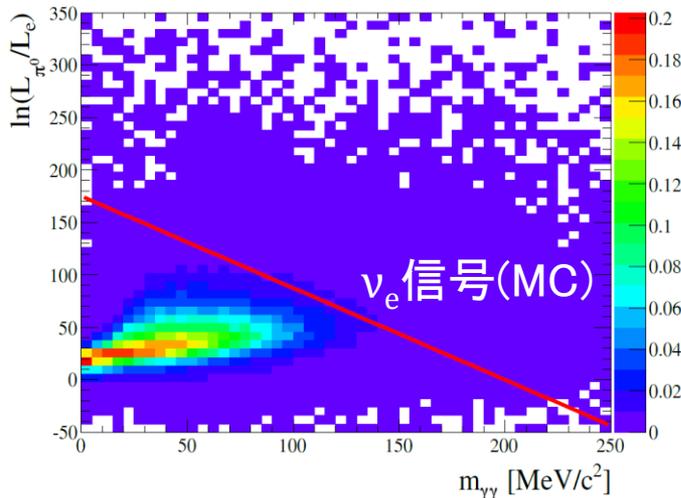
- 従来: リングの発光パターンでフィット (POLfit)
- 今回: 様々な粒子を想定し、時間・電荷を予想して複数の飛跡までフィット (fiTQun)



- イベント選択

- 従来: 再構成した π^0 質量のみでカット
- 今回: 再構成した π^0 質量と尤度比を用いた2次元カット
- ν_e 信号: -2%(従来とほぼ変わらず), π^0 B.G.: -70%(除去率が4割アップ)

(6)再構成した π^0 質量と尤度比を用いた2次元カット → 28イベントが最終的な ν_e 候補



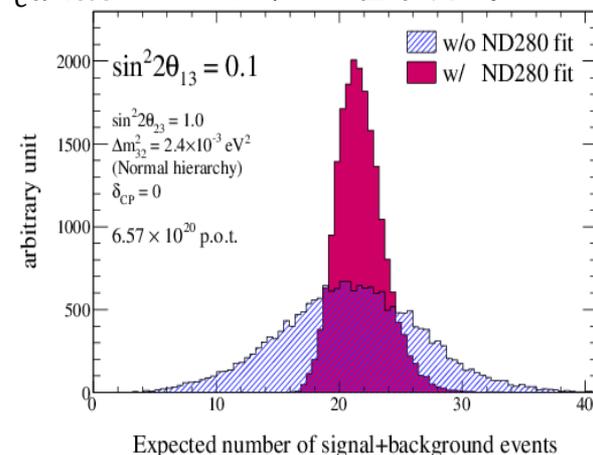
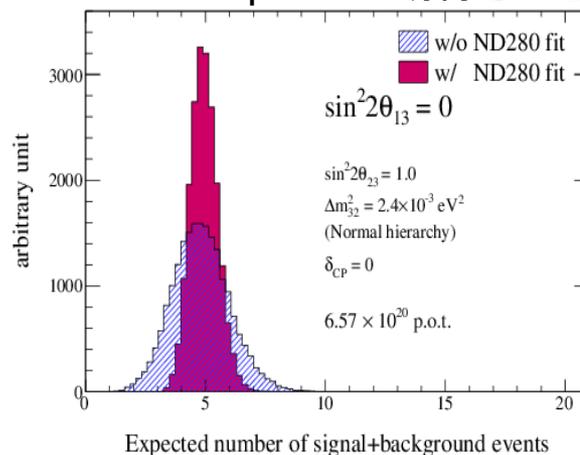
ν_e 候補イベント数

- ND280による制限により系統誤差が半分以下になる。
- $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$ ではND280で制限されないニュートリノ反応の不定性が主要な系統誤差の起源。

Super-Kでの ν_e 候補イベント数
(ND280制限後)

データ	28	
MC	$\sin^2 2\theta_{13} = 0$	$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$
$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 信号	0.4	17.7
ν_e B.G.	3.6	3.3
ν_μ B.G.	2.5	2.5
$\bar{\nu}_\mu + \bar{\nu}_e$ B.G.	0.3	0.3
MC 合計	6.7	23.8

Super-Kで期待される ν_e 候補イベント数の確率分布



Super-Kでの ν_e 候補イベント数に対する誤差

誤差の起源	$\sin^2 2\theta_{13} = 0$		$\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$	
	ND280制限前	ND280制限後	ND280制限前	ND280制限後
ν フラックス × ν 反応 (ND280測定)	21.8%	4.8%	26.0%	2.9%
ν 反応 (ND280で制限されないもの)	7.1%		7.6%	
Super-K (+Super-Kでの相互作用)	7.3%		3.5%	
合計	24.4%	11.4%	27.5%	8.9%
合計(2012)	21.1%	13.3%	24.3%	9.8%

ν_e 出現モードの振動解析

- 最尤法を用いて電子の運動量と角度の2次元分布を最も再現する θ_{13} を探す。

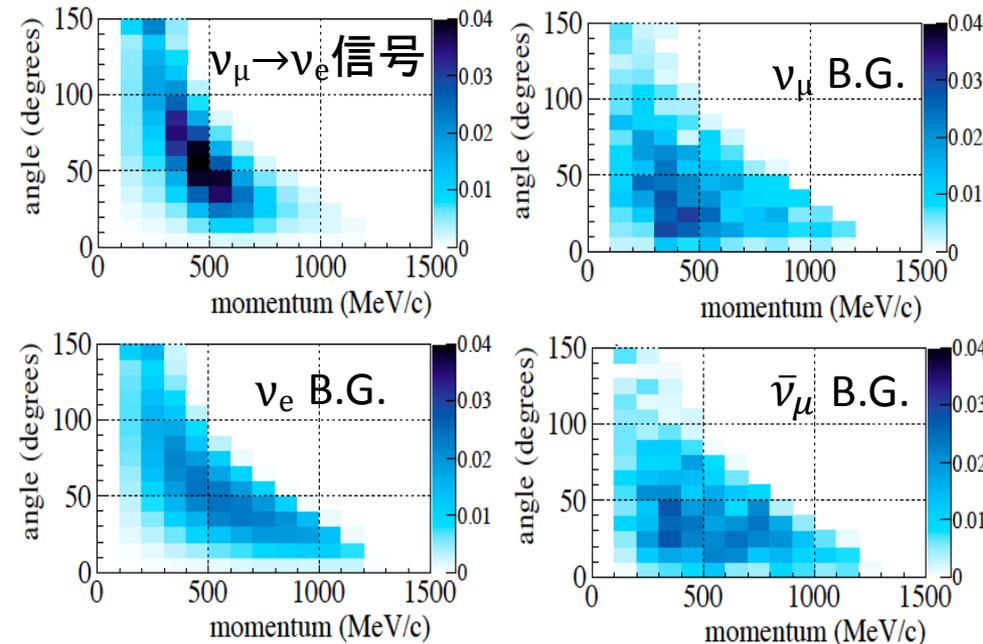
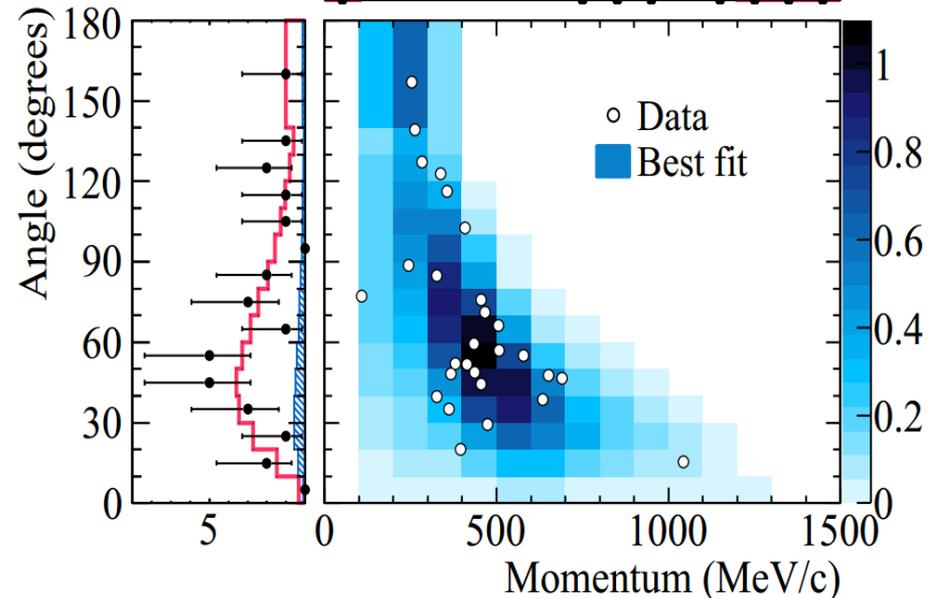
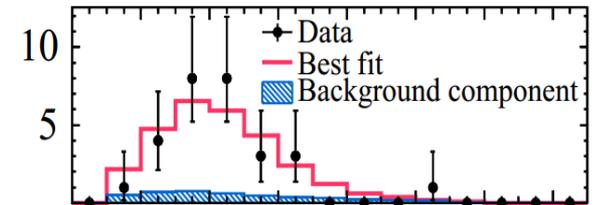
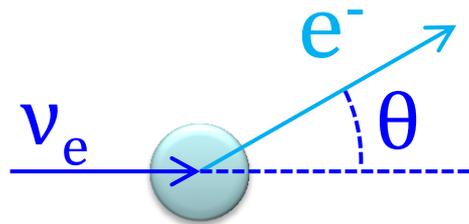
ポアソン分布

各イベントの電子の
p- θ 分布の確率の積

各系統誤差
の不定性

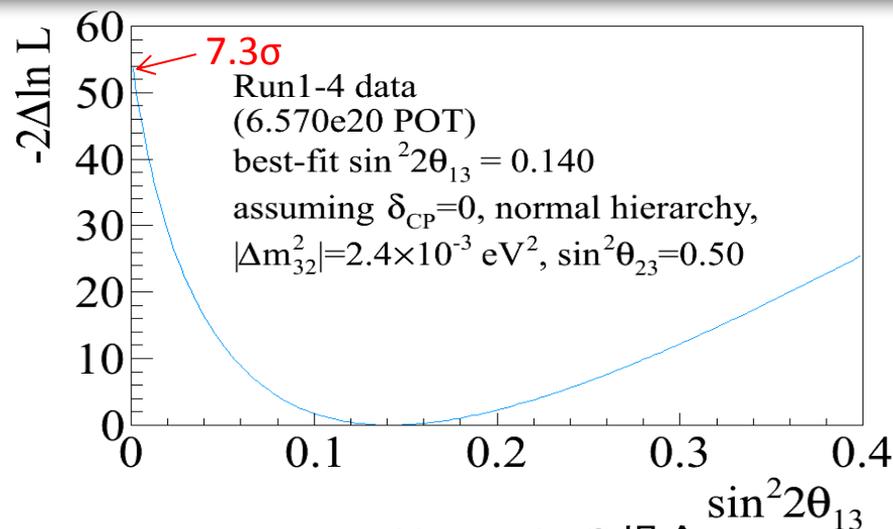
$$\mathcal{L}(N_{obs.}, \mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) = \mathcal{L}_{norm}(N_{obs.}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{shape}(\mathbf{x}; \mathbf{o}, \mathbf{f}) \times \mathcal{L}_{syst.}(\mathbf{f})$$

$N_{obs.}$: ν_e 候補イベント数
 \mathbf{x} : 運動量-角度ビン
 \mathbf{o} : 振動パラメータ
 \mathbf{f} : 系統誤差

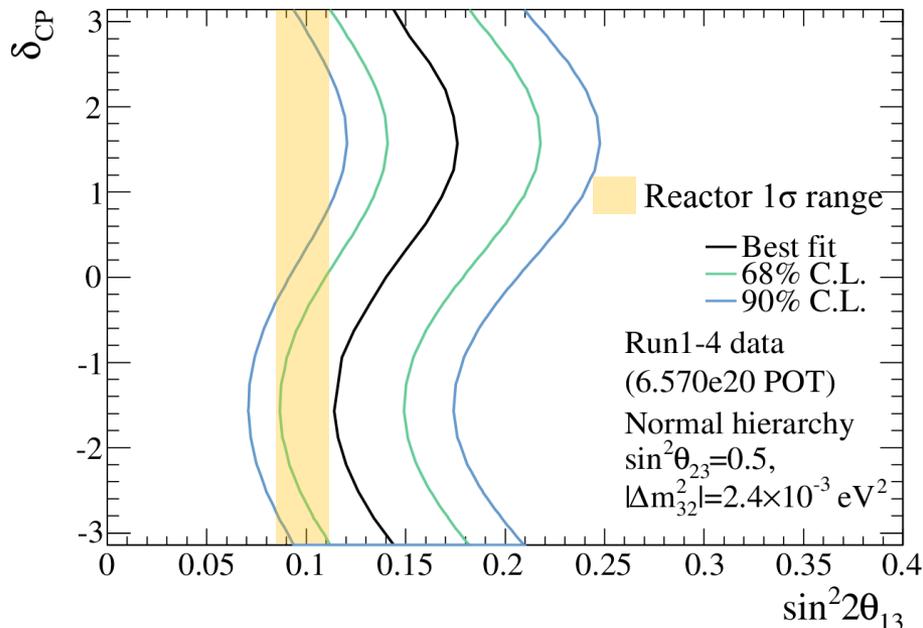


$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動の有意度、 θ_{13} - δ_{CP} の信頼領域

- $\theta_{13} \neq 0$ の有意度は 7.3σ 。
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を”発見”。
- $|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^2$,
 $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ のときの θ_{13} - δ_{CP}
の信頼領域は以下の通り。

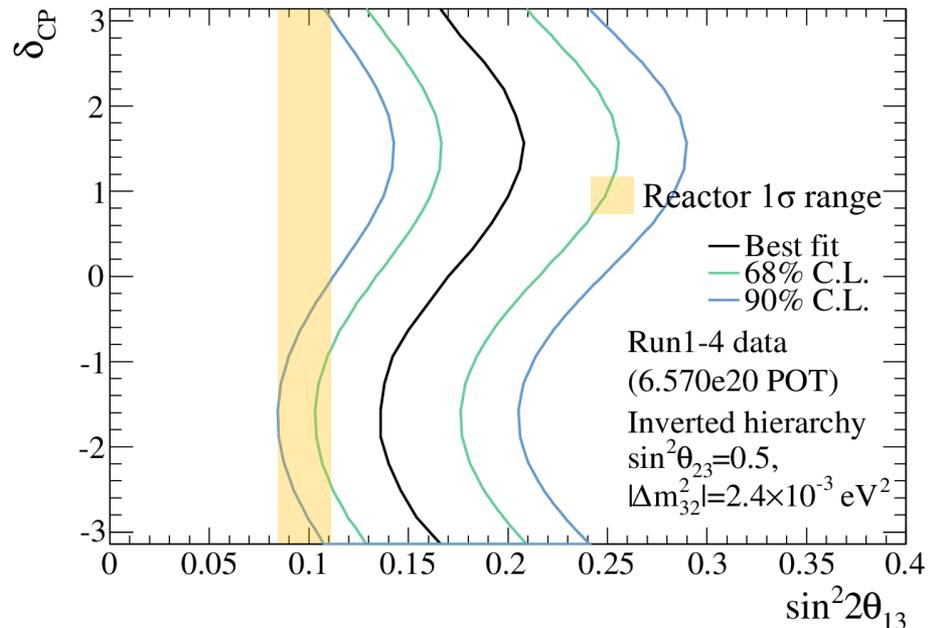


Normal hierarchyの場合



$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.140^{+0.038}_{-0.032} \quad (\delta_{CP} = 0 \text{ のとき})$$

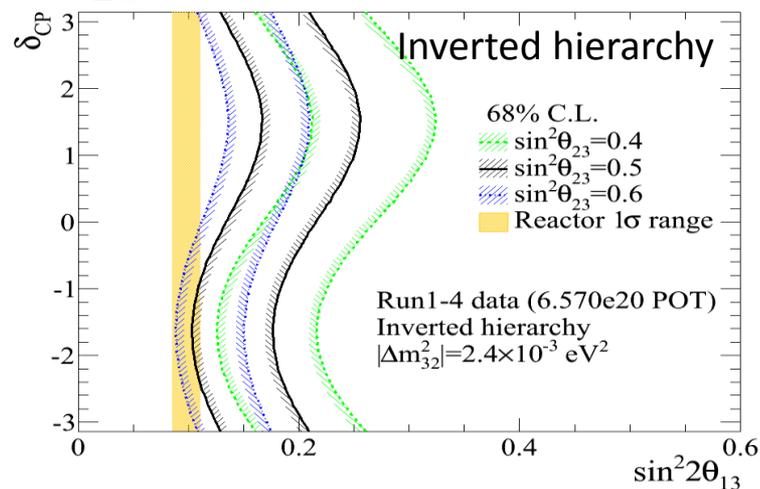
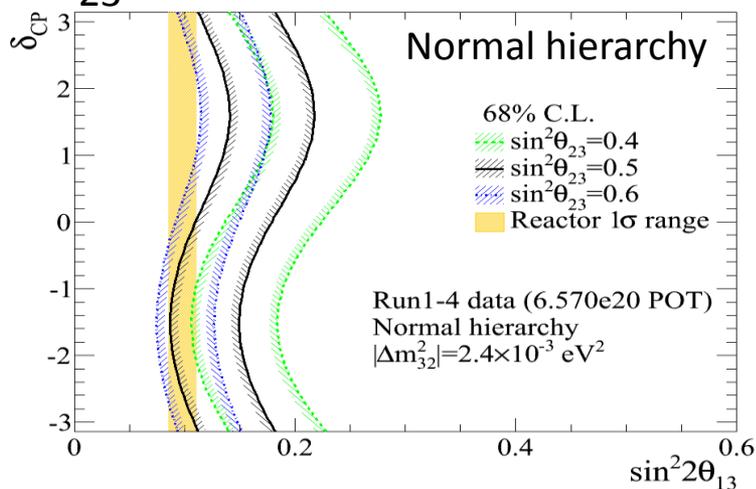
Inverted hierarchyの場合



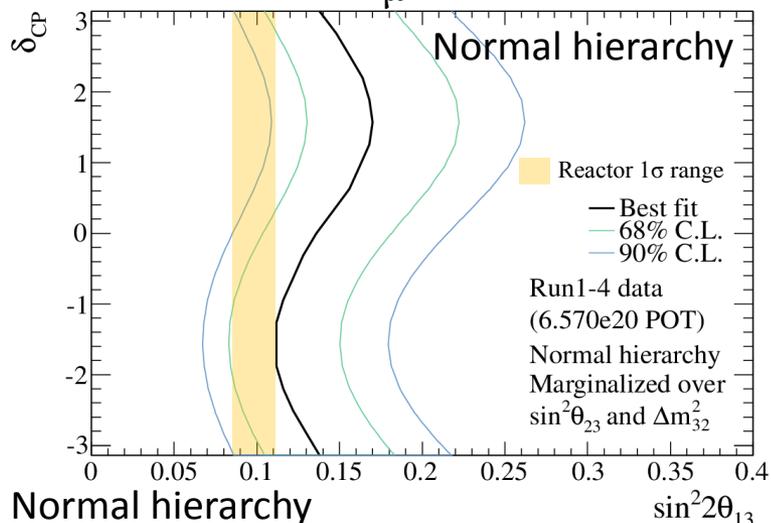
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.170^{+0.045}_{-0.037} \quad (\delta_{CP} = 0 \text{ のとき})$$

$\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ の不定性の影響

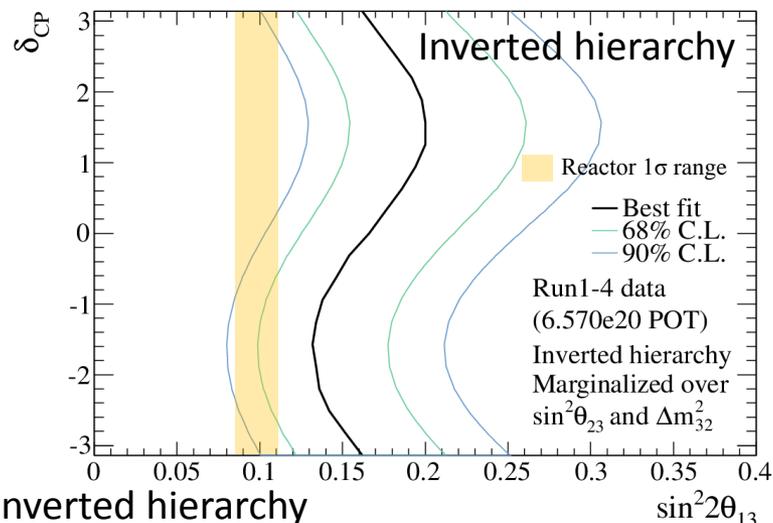
- θ_{23} の不定性の影響が大きい。 $(\sin^2\theta_{23} = 0.50 \pm 0.11)$



- T2K実験の ν_μ 消失による $\theta_{23}, \Delta m_{32}^2$ をフィットの尤度関数に追加。



Normal hierarchy
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.136^{+0.044}_{-0.033}$ ($\delta_{CP} = 0$ のとき)



Inverted hierarchy
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.166^{+0.051}_{-0.042}$ ($\delta_{CP} = 0$ のとき)

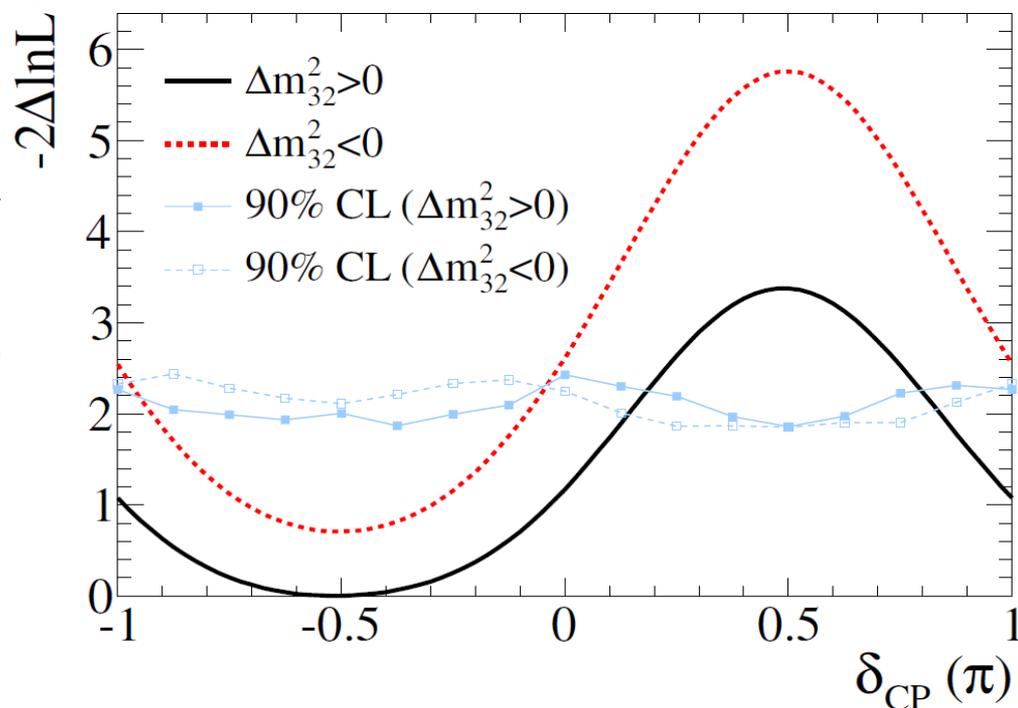
δ_{CP} への制限

- T2Kの結果を原子炉ニュートリノによる θ_{13} の測定結果と組み合わせて初めて δ_{CP} への制限を与えた。
- $\delta_{CP} = -\pi/2$ が最も好まれる。
- $0.19\pi \sim 0.80\pi$ (Normal hierarchy)
 $-\pi \sim -0.97\pi, -0.04\pi \sim \pi$ (Inverted hierarchy)
 の領域を90% C.L.で棄却。
- ν_μ 消失モードの測定結果がアップデートされれば、より厳しい制限を与えられることが期待できる。
- ν_e 出現モードと ν_μ 消失モードを同時にフィットする3世代間同時解析も進行中。



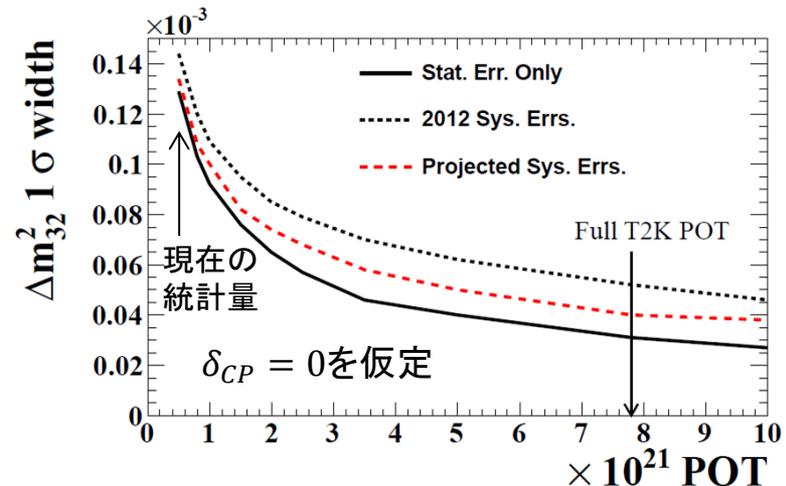
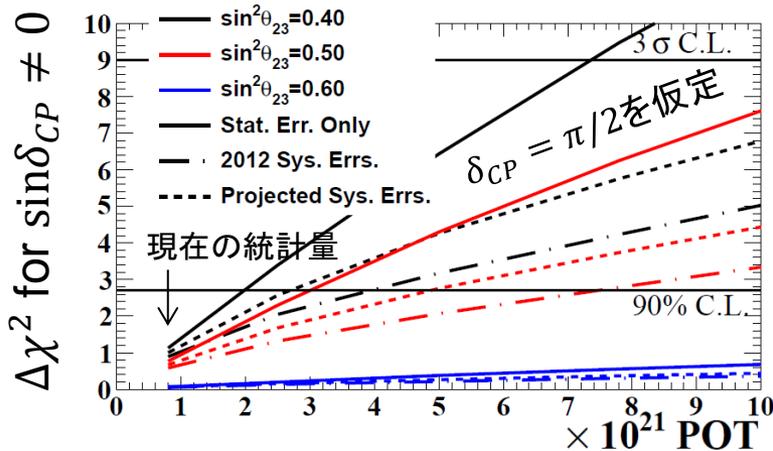
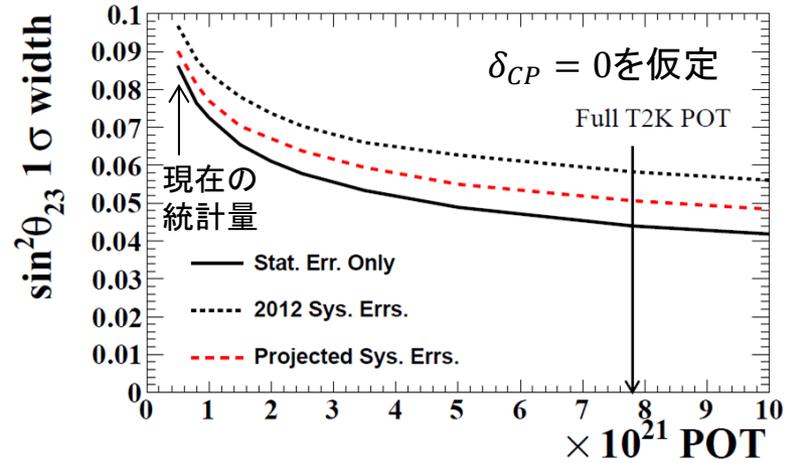
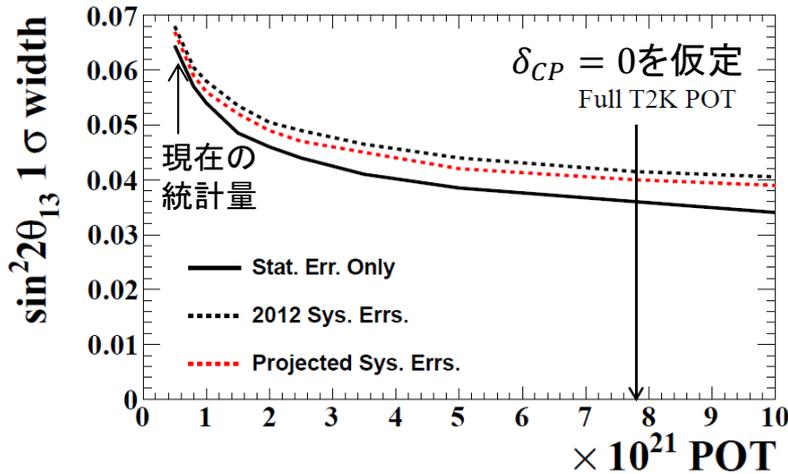
家城 (京都大学)

δ_{CP} への制限



今後の期待される精度 (ν モード:100%の時)

- 今は統計誤差が支配的。→ 統計をためることが最も重要。
- 統計をためるにつれて、系統誤差抑制の重要性が増してくる。



$|\Delta m_{32}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{eV}^2/c^2$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$, $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$, normal hierarchyを仮定。

ν_μ 候補イベント数の系統誤差

- フラックスとCCQE等からの誤差は反相関で大半がキャンセル。
- Run1-3の結果ではSuper-Kの検出効率由来の系統誤差が大きい。
- Run1-4の結果では減少する予定。
 - リング数の系統誤差を最新の大気ニュートリノデータとMCをコントロールサンプルとして再評価。
 - NCの粒子識別の系統誤差を正確に評価。
- 実際の測定にはエネルギー分布の誤差も大きく効いてくる。

誤差の起源	誤差
SK ν_μ CCQE (<0.4GeV)	0.2%
SK ν_μ CCQE (0.4~1.1GeV)	1.0%
SK ν_μ CCQE (>1.1GeV)	2.4%
SK ν_μ CCnonQE	7.8%
SK ν_e CC	0.2%
SK NC	6.4%

Super-K +相互作用

ν フラックス× ν 反応 (ND280測定)
 ν 反応 (ND280で制限されないもの)

ν_μ 候補イベント数の誤差の内訳 (ND280制限後, Run1-3の結果)

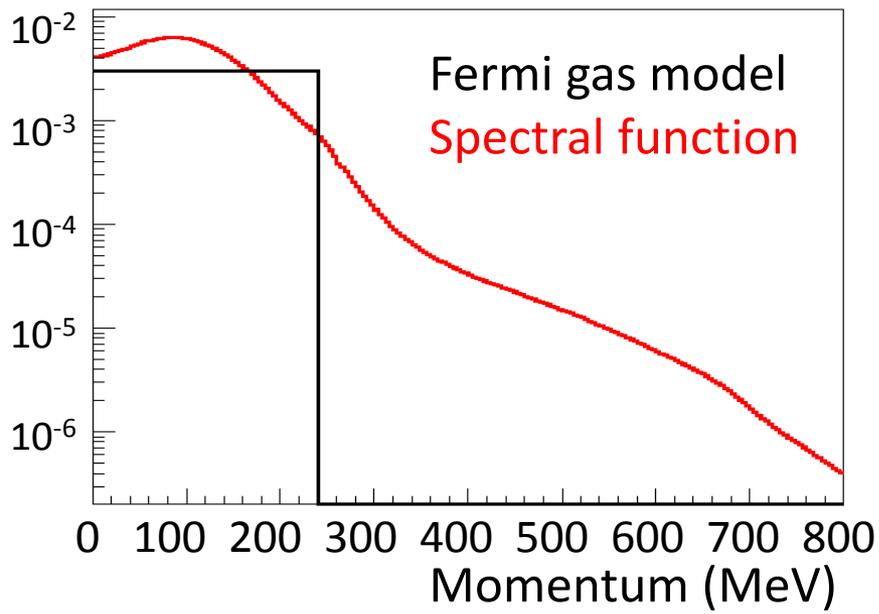
誤差の起源	誤差
フラックス	7.1%
M_A^{QE} (GeV)	7.0%
M_A^{RES} (GeV)	4.4%
CCQE規格化 (<1.5GeV)	3.5%
CCQE規格化 (1.5~3.5GeV)	3.0%
CCQE規格化 (>3.5GeV)	1.0%
CC1 π 規格化 (<2.5GeV)	2.9%
CC1 π 規格化 (>2.5GeV)	3.3%
CC other shape	0.8%
Spectral function	0.7%
フェルミ運動量	0.1%
CC coherent規格化	0.9%
NC1 π^\pm 規格化	0.9%
NC other規格化	0.8%
W shape	0.4%
π less Δ -decay	6.2%
$\sigma_{\bar{\nu}}/\sigma_\nu$	2.4%

反相関

ν_e 候補イベント数の系統誤差

- 原子核模型(フェルミ気体模型と Spectral functionの差)からの誤差が最大。
- Spectral functionをMCに実装し、誤差を正確に評価すれば劇的に小さくなるはず。→ほぼ完了。

原子核模型による運動量分布の違い



ν_e 候補イベント数の誤差の内訳 (ND280制限後, $\sin^2 2\theta_{13} = 0.1$)

誤差の起源	誤差
フラックス	7.5%
M_A^{QE} (GeV)	3.1%
M_A^{RES} (GeV)	1.1%
CCQE規格化	6.2%
CC1 π 規格化	2.0%
NC1 π^0 規格化	0.4%
CC other shape	0.1%
Spectral function	6.0%
フェルミ運動量	0.1%
CC coherent規格化	0.2%
NC coherent規格化	0.2%
NC1 π^+ 規格化	0.5%
ν_e CC/ ν_μ CC	2.9%
W shape	0.2%
π less Δ -decay	3.7%
SK検出効率	2.4%
FSI+二次相互作用	2.3%
Photo-nuclear	0.8%
SKエネルギースケール	0.5%
合計	8.9%

ν フラックス \times ν 反応 (ND280測定)

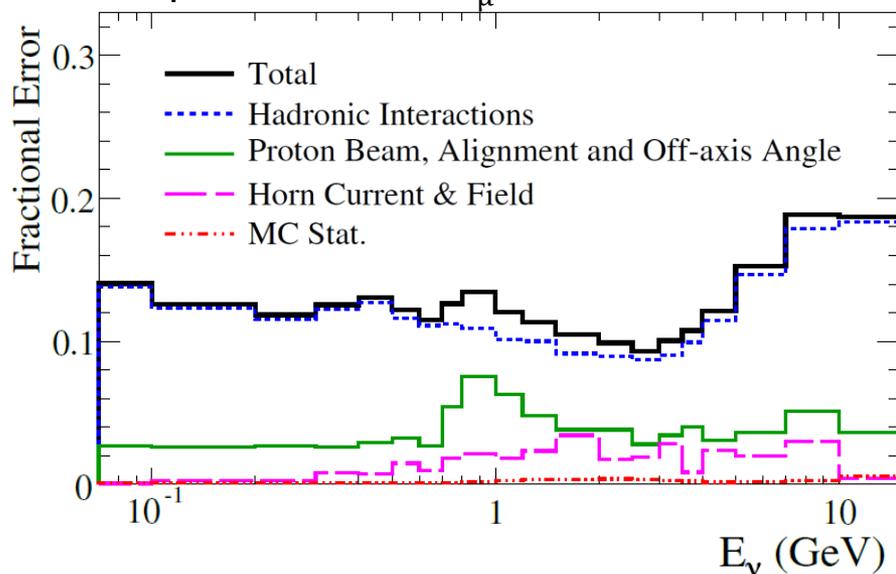
ν 反応 (ND280で制限されないもの)

Super-K +相互作用

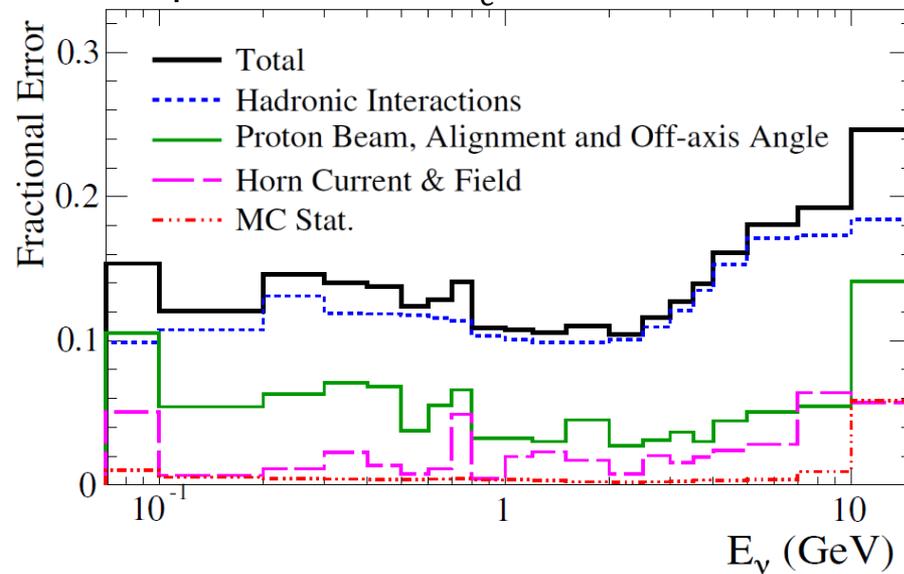
反相関

- フラックスの不定性はハドロン生成の不定性起因が支配的。
→ NA61のハドロン生成データのアップデート、これまでMCの調整に用いていないもの(二次核子など)も用いることにより、改善が見込まれる。

Super-Kにおける ν_μ フラックスの不定性



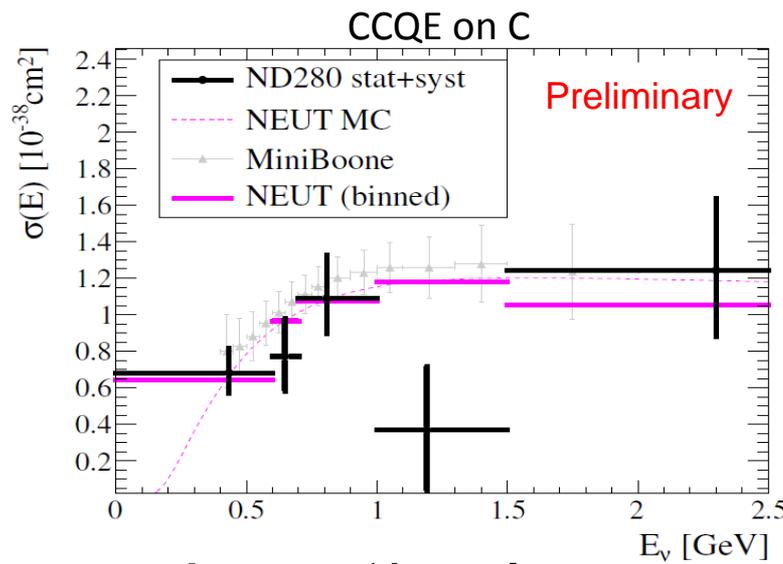
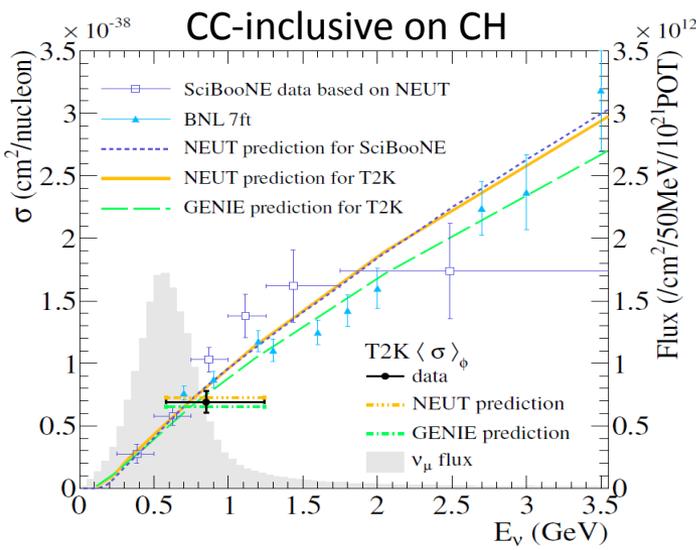
Super-Kにおける ν_e フラックスの不定性



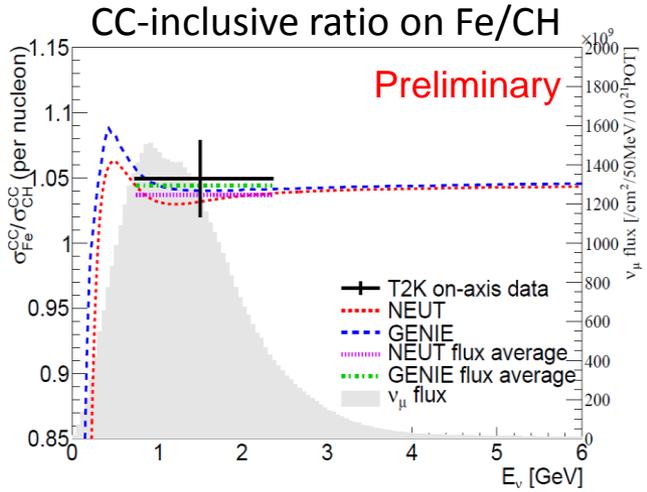
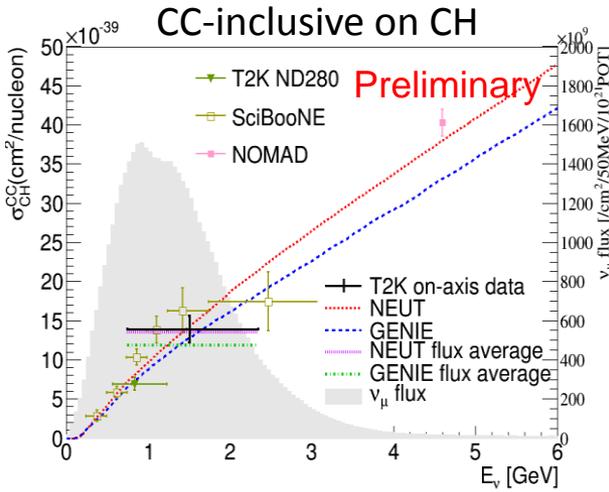
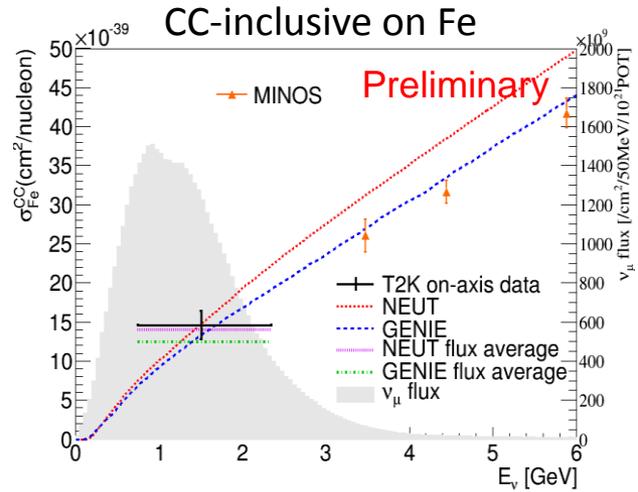
- ニュートリノ相互作用の不定性は外部実験から評価してきた。
→ さらなる不定性の抑制のためにはT2K実験自身による、より高精度なニュートリノ相互作用の測定が求められる。

ND280でのニュートリノ反応断面積測定

- まだ本気を出していない。
- 様々な測定が進行中。
- 現在はフラックスの不定性由来の誤差が支配的だが小さくなるはず。
- 今後の結果に乞うご期待。



INGRIDでのニュートリノ反応断面積測定



- T2K Run1-4の 6.57×10^{20} POT(目標統計の8%)のデータを解析した結果、 ν_e 出現イベントの候補が28イベント見つかった。
- 電子の運動量と角度の2次元分布を用いた解析の結果、
 $\delta_{CP} = 0$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1.0$ のとき、
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.140_{-0.032}^{+0.038}$ (Normal hierarchy)
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.170_{-0.037}^{+0.045}$ (Inverted hierarchy)
 $\theta_{13} = 0$ を 7.3σ で棄却。 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動を発見。
- T2K実験の結果を原子炉ニュートリノの結果と組み合わせて、初めて δ_{CP} への制限を与えた。
- ν_μ 消失モードのRun1-4データの解析結果も近々公開予定。
- 系統誤差抑制のために様々な努力がされている。